

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Danijel Mirošević

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc.. Pero Prebeg

Student:

Danijel Mirošević

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Peri Prebegu, dipl. ing. na pomoći, podršci i strpljenju tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Hvala izv.prof.dr.sc Jerolimu Andriću na korisnim primjedbama i savjetima tijekom izrade ovog rada.

Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima, bratu i djevojci na podršci i strpljenju tokom svih godina studiranja.

Danijel Mirošević



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za završne i diplomске ispite studija brodogradnje



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Danijel Mirošević**

Mat. br.: 0135211081

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **OPTIMIZACIJA KONSTRUKCIJE NABORANE PREGRADE TANKERA ZA PRIJEVOZ NAFTE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **STRUCTURAL OPTIMIZATION OF AN OIL TANKER CORRUGATED BULKHEAD**

Opis zadatka:

Učestalost primjene naboranih pregrada kod projektiranja konstrukcije tankera očituje se u mogućnosti uštede u masi konstrukcije te lakšeg čišćenja i održavanja, koje ovaj tip pregrada omogućuje u odnosu na tradicionalne ukrepljene pregrade. Za ostvarivanje optimalnih karakteristika s obzirom na odabrane kriterije kvalitete, nužno je usuglasiti topološke, geometrijske i dimenzijske parametre, koji definiraju konstrukciju naborane pregrade. U radu je potrebno implementirati matematički model za dimenzioniranje naborane pregrade prema preskriptivnim harmoniziranim zajedničkim pravilima za projektiranje konstrukcije brodova za prijevoz rasutog tereta i tankera za prijevoz nafte Međunarodnog udruženja klasifikacijskih društava (IACS CSR BC & OT). Primjenom navedenog matematičkog modela potrebno je optimizirati konstrukciju naborane pregrade na odabranom primjeru.

Zadatak obuhvaća sljedeće:

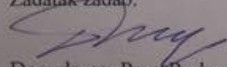
- upoznavanje s konstrukcijskim značajkama naboranih pregrada
- upoznavanje s harmoniziranim pravilima, s naglaskom na dimenzioniranje konstrukcije naborane pregrade prema preskriptivnim pravilima
- izradu matematičkog modela za dimenzioniranje naborane pregrade prema harmoniziranim pravilima
- izradu optimizacijskog modela za dimenzioniranje naborane pregrade na odabranom primjeru
- analizu rezultata optimizacije odnosno različitih topološko-geometrijskih varijanti te odabir preferiranih varijanti
- analizu čvrstoće preferiranih varijanti metodom konačnih elemenata te usporedbu njihove kvalitete.

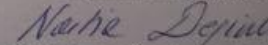
U radu treba navesti korištenu literaturu te eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
16. studenog 2017.

Datum predaje rada:
18. siječnja 2018.

Predviđeni datumi obrane:
24., 25. i 26. siječnja 2018.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Pero Prebeg

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. PREGLED OSNOVNIH TIPOVA PREGRADA	2
2.1. Opis i svrha pregrada	2
2.2. Vrste pregrada	2
2.2.1. Nepropusne pregrade	2
2.2.1.1. Sudarna pregrada	3
2.2.1.2. Pregrada statvene cijevi	4
2.2.1.3. Pregrade skladišnog prostora	5
2.2.1.4. Ostale nepropusne pregrade	5
2.2.2. Propusne pregrade.....	5
2.3. Konstrukcija nepropusnih pregrada	6
2.3.1. Pregrade sa ravnim opločenjem i s ukrepama.....	6
2.3.2. Pregrade od naboranih (korugiranih) limova	7
2.4. Opterećenja pregrada	8
2.5. Provjera nepropusnosti.....	8
3. IZRADA MATEMATIČKOG MODELA ZA DIMENZIONIRANJE NABORANE PREGRADE PREMA HARMONIZIRANIM PRAVILIMA (IACS CSR BC & OT).....	9
3.1. Opći zahtjevi	9
3.1.1. Konstrukcija pregrade	9
3.1.2. Naborane pregrade	9
3.1.2.1. Konstrukcija	9
3.1.2.2. Minimalna dubina korugacije	10

3.1.2.3.	Dubina korugacije prema odabranim parametrima.....	10
3.1.2.4.	Duljina korugacije.....	10
3.1.2.5.	Stvarni moment otpora korugacije.....	12
3.1.2.6.	Raspon korugacije.....	13
3.1.2.7.	Oslonci krajeva pregrade	13
3.2.	Lokalne dimenzije trupa.....	14
3.2.1.	Minimalna debljina oplata pregrade	14
3.2.2.	Oplata izložena bočnom (latelarnom) tlaku	14
3.2.2.1.	Oplata naborane pregrade	14
3.3.	Zahtjevi za pregrade tankera	15
3.3.1.	Primjena	15
3.3.2.	Debljina oplata po visini	15
3.3.3.	Debljina struka pregrade po visini	15
3.3.4.	Debljina prirubnice po visini naborane pregrade.....	16
3.3.5.	Moment otpora po visini naborane pregrade	17
3.4.	Korozija.....	23
3.5.	Ukupna masa naborane pregrade	24
3.6.	Ukupna cijena izrade naborane pregrade	24
4.	IZRADA OPTIMIZACIJSKOG MODELA ZA DIMENZIONIRANJE NABORANE PREGRADE NA ODABRANOM PRIMJERU	25
4.1.	Optimizacijska metoda.....	26
4.2.	Definicija optimizacijskog problema	27
4.3.	Usporedba različitih optimalnih rješenja	29
4.4.	Usporedba prototipne i optimalne pregrade	30
5.	ANALIZA ČVRSTOĆE OPTIMALNE NABORANE PREGRADE METODOM KONAČNIH ELEMENATA	32
5.1.	O metodi konačnih elemenata [6]	32
5.1.1.	Računalni program MAESTRO.....	32
5.2.	Slučajevi opterećenja [3].....	33
5.3.	Analiza podobnosti [4].....	34
5.4.	Analiza rezultata MKE.....	35
5.4.1.	Odziv prototipa	35
5.4.2.	Odziv optimalnog modela.....	38

5.5. Prijedlog rješenja.....	42
6. ZAKLJUČAK.....	43
LITERATURA.....	44

POPIS SLIKA

Slika 1.	Sudarna pregrada broda pune forme [1].....	3
Slika 2.	Pregrada statvene cijevi (krmenog pika) [1]	4
Slika 3.	Pljuskače u krmenom i pramčanom piku [2].....	5
Slika 4.	Ravne nepropusne pregrade od limova s ukrepljenjem u krmenom dijelu broda [1]	6
Slika 5.	Poprečna vertikalno korugirana pregrada broda za tekuće terete sa strukturom oslonaca [1]	7
Slika 6.	Dimenzije korugirane pregrade [3]	10
Slika 7.	Raspon korugacije [3]	13
Slika 8.	Definicija parametara naborane pregrade (tankeri s uzdužnom pregradom na sredini broda) [3]	22
Slika 9.	Dio grafičkog sučelje razvijenog matematičkog modela za unos osnovnih podataka o projektiranoj pregradi.....	26
Slika 10.	GRG nelinearna metoda [5]	27
Slika 11.	Dio grafičkog sučelje razvijenog matematičkog modela za definiciju optimizacijskog problema	28
Slika 12.	Geometrijski prikaz naborane pregrade u prototipu	31
Slika 13.	Geometrijski prikaz optimalne pregrade	31
Slika 14.	Prikaz pomaka prototipa.....	35
Slika 15.	Naprezanja u smjeru osi x prototipa.....	36
Slika 16.	Smična naprezanja prototipa	36
Slika 17.	Von Mises naprezanja prototipa.....	37
Slika 18.	PSPB kriterij podobnosti prototipa.....	37
Slika 19.	Prikaz pomaka optimalnog modela	38
Slika 20.	Prikaz naprezanja u smjeru osi x optimalnog modela	38
Slika 21.	Prikaz smičnih naprezanja optimalnog modela	39
Slika 22.	Prikaz Von Mises naprezanja optimalnog modela	39
Slika 23.	PSPB kriterij podobnosti optimalnog modela	40
Slika 24.	PCMY kriterij podobnosti optimalnog modela	40
Slika 25.	PFLB kriterij podobnosti odabranog modela	41

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijednosti C_i	19
Tablica 2. Dodatak zbog korozije [3].....	23
Tablica 3. Glavne dimenzije broda.....	25
Tablica 4. Raspon projektnih varijabli	28
Tablica 5. Optimalna rješenja.....	29
Tablica 6. Dimenzije optimalne pregrade	29
Tablica 7. Dimenzije naborane pregrade u prototipu	30
Tablica 8. Usporedba prototipne i optimalne pregrade	30
Tablica 9. Opis odabranih slučajeva opterećenja	33
Tablica 10. Usporedba nakon prve faze proračuna	42
Tablica 11. Usporedba rezultata nakon povećanja debljine	42

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
L	m	Duljina broda;
B	m	Širina broda;
D	m	Visina broda;
T	mm	Gaz broda;
a	mm	Duljina oplata prirubnice;
c	mm	Duljina oplata struka;
d	mm	Dubina korugacije;
t	mm	Debljina;
t_f	mm	Debljina prirubnice naborane pregrade;
t_w	mm	Debljina struka naborane pregrade;
s_c	mm	Duljina korugacije;
φ	°	Kut korugacije;
l_{blk}	mm	Duljina naborane pregrade;
n_{corr}		Broj korugacija;
b	mm	Širina tanka;
Z	cm ³	Moment otpora;
l_c	m	Visina naborane pregrade;
t_{min}	mm	Minimalna debljina;
P	kN/m ²	Tlak;
C_{CB}		Dopušteni koeficijent savijanja;
ReH	N/mm ²	Granica razvlačenja;
b_p	mm	Duljina oplata naborane pregrade;
Q_{cg}	kN	Projektna smična sila;
d_{cg}	mm	Dubina korugacije;
C_{t-cg}		Koeficijent dozvoljenog smičnog naprezanja;
τ_{eH}	N/mm ²	Smična granica razvlačenja;
l_{cg}	mm	Visina naborane pregrade;
P_l	kN/m ²	Projektni tlak na donjem kraju pregrade;
P_u	kN/m ²	Projektni tlak na gornjem kraju pregrade;

b_{f-cg}	mm	Duljina oplata struka naborane pregrade;
$\sigma_{bdg-max}$	N/mm ²	Vertikalno savojno naprezanje;
E	N/mm ²	Young-ov modul elastičnosti;
S		Statički slučaj opterećenja;
$S+D$		Dinamički slučaj opterećenja;
M_{cg}	N/mm ²	Vertikalni moment savijanja;
b_{w-cg}	mm	Duljina struka korugacije;
C_{s-cg}		Koeficijent dopuštenog savojnog opterećenja;
l_0	m	Efektivni savojni raspon korugacije;
A_{dt}	m ²	Površina poprečnog presjeka gornje stule;
b_{dk}	m	Duljina tanka između gornjih balastnih tankova;
A_{bt}	m ²	Površina poprečnog presjeka donje stule;
b_{ib}	m	Duljina tanka između donjeg balastnog tanka i donje stule uzdužne pregrade;
l_{ib}	m	Duljina tanka između donjih poprečnih stula;
b_{av-t}	m	Prosječna širina donje stule poprečne pregrade;
h_{st}	m	Visina donjeg postolja;
W	m	Masa pregrade;
C_{TOT}	€	Cijena izrade;
V	čv	Brzina broda u službi;
V_{max}	čv	Maksimalna brzina broda;

SAŽETAK

Projektiranje i gradnja konstrukcije broda za prijevoz nafte danas se provodi prema preskriptivnim harmoniziranim zajedničkim pravilima za projektiranje konstrukcije brodova za prijevoz rasutog tereta i tankera za prijevoz nafte (IACS CSR (BC & OT)). Za određivanje dimenzija konstrukcije potrebno je prvo provesti dimenzioniranje prema preskriptivnim pravilima te u idućem. U ovom radu je prema harmoniziranim pravilima napravljen matematički model za određivanje minimalnih dimenzija konstrukcije naborane pregrade. Uz pomoć rješavača unutar Excel programskog paketa napravljena je optimizacija s ciljem minimizacije mase i cijene izrade pregrade. Analiza čvrstoće optimalne geometrije naborane pregrade provedena je metodom konačnih elemenata primjenom programskog paketa MAESTRO.

Ključne riječi: tanker za prijevoz nafte, naborana pregrada, CSR BC & OT, optimizacija, metoda konačnih elemenata

SUMMARY

Today the design and construction of oil tankers is carried out according to the Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers (CSR BC & OT). To determine the structural dimension, in addition to prescriptive rules, it is necessary to conduct the structural analysis using finite element method (FEM). In this master's thesis, a mathematical model for the determination of the minimum dimensions of corrugated bulkhead is made according to the harmonized rules. With the help of solver within the Excel program package, optimization has been made to minimize the mass of the bulkhead and to minimize the cost production of the bulkhead. The analysis of the strength of the optimum geometry of the corrugated bulkhead was performed by the finite element method using the MAESTRO program package.

Key words: Oil tankers, corrugated bulkheads, CSR BC & OT, optimization, finite element method

1. UVOD

Naborane pregrade kao konstrukcijsko rješenje kod tankera za prijevoz nafte se danas sve više primjenjuju te su postale poželjnije konstrukcijsko rješenje u odnosu na ravne ukrepljene pregrade. Razloga za to ima više. Ponajprije ušteda u masi pregrade, zatim lakše čišćenje i održavanje te manji korozijski problemi. Mnoga su istraživanja provedena za pronalazak optimalnog oblika naborane pregrade, ali ponajviše za brodove za prijevoz rasutog tereta.

Cilj ovog rada jest razvoj metode kojom se uz pomoć optimizacijskog algoritma određuje optimalna geometrija poprečne vertikalne naborane pregrade tankera za prijevoz nafte uz zadovoljenje minimalnih dimenzija prema preskriptivnim harmoniziranim zajedničkim pravilima za projektiranje konstrukcije brodova za prijevoz rasutog tereta i tankera za prijevoz nafte.

U drugom poglavlju ovog rada prikazani su i opisani osnovni tipovi pregrada koji nalazimo na današnjim trgovačkim brodovima.

Treće poglavlje rada posvećeno je izradi matematičkog modela za dimenzioniranje naborane pregrade prema preskriptivnim harmoniziranim zajedničkim pravilima za projektiranje konstrukcije brodova za prijevoz rasutog tereta i tankera za prijevoz nafte Međunarodnog udruženja klasifikacijskih društava (IACS:CSR BC & OT). Formule koje definiraju dimenzioniranje naborane pregrade prema navedenim pravilima, integrirane su u programski kod matematičkog modela za projektiranje naborane pregrade unutar programskog paketa Excel, odnosno Visual Basic for Application.

U četvrtom poglavlju rada prethodno izrađeni model primijenjen je za dimenzioniranje tankera za prijevoz nafte. Pri tome je izrađeni matematički model za određivanje minimalnih dimenzija prema preskriptivnim pravilima povezan s rješavačem optimizacijskih problema dostupnim u programskom paketu Excel kojima su riješeni postavljeni optimizacijski problemi za optimizaciju s ciljem minimizacije cijene i minimizacije mase naborane pregrade.

U petom poglavlju je provedena analiza i usporedba prototipne i optimalne pregrade metodom konačnih elemenata, primjenom računalnog sustava MAESTRO.

2. PREGLED OSNOVNIH TIPOVA PREGRADA

Radi cjelovitosti prikaza problema optimizacije konstrukcije naborane pregrade, u ovom poglavlju dan je pregled osnovnih tipova pregrada koji je preuzet iz [1] i [2] .

2.1. Opis i svrha pregrada

Pregrade su manje konstrukcijske cjeline koje postoje kao opločenje ili ukrepljeni paneli kojima se odjeljuje određeni prostor na brodu. Po orijentaciji pregrade mogu biti poprečne ili uzdužne. Na gotovo svim većim brodovima pregrade su neizostavan dio brodske konstrukcije.

Tri osnovna aspekta uvjetuju postavljanje pregrada. To su:

- sigurnosni aspekt
- konstrukcijski aspekt
- ekološki aspekt.

U sigurnosnom smislu, pregrade sprečavaju potonuće u slučaju prodora vode u neki prostor, kao i širenje vatre u slučaju požara. Također, u sigurnosnom smislu treba napomenuti ulogu pregrada u prevenciji zapljuskivanja tzv. '*sloshinga*' u velikim tankovima koji može uvelike narušiti stabilitet broda.

U konstruktivnom smislu pregrade služe kao elementi poprečne i uzdužne čvrstoće.

U ekološkom smislu pregrade smanjuju zagađenje u slučajevima oštećenja stijenki tankova.

2.2. Vrste pregrada

Dvije su osnovne vrste pregrada:

- nepropusne pregrade
- propusne pregrade.

2.2.1. *Nepropusne pregrade*

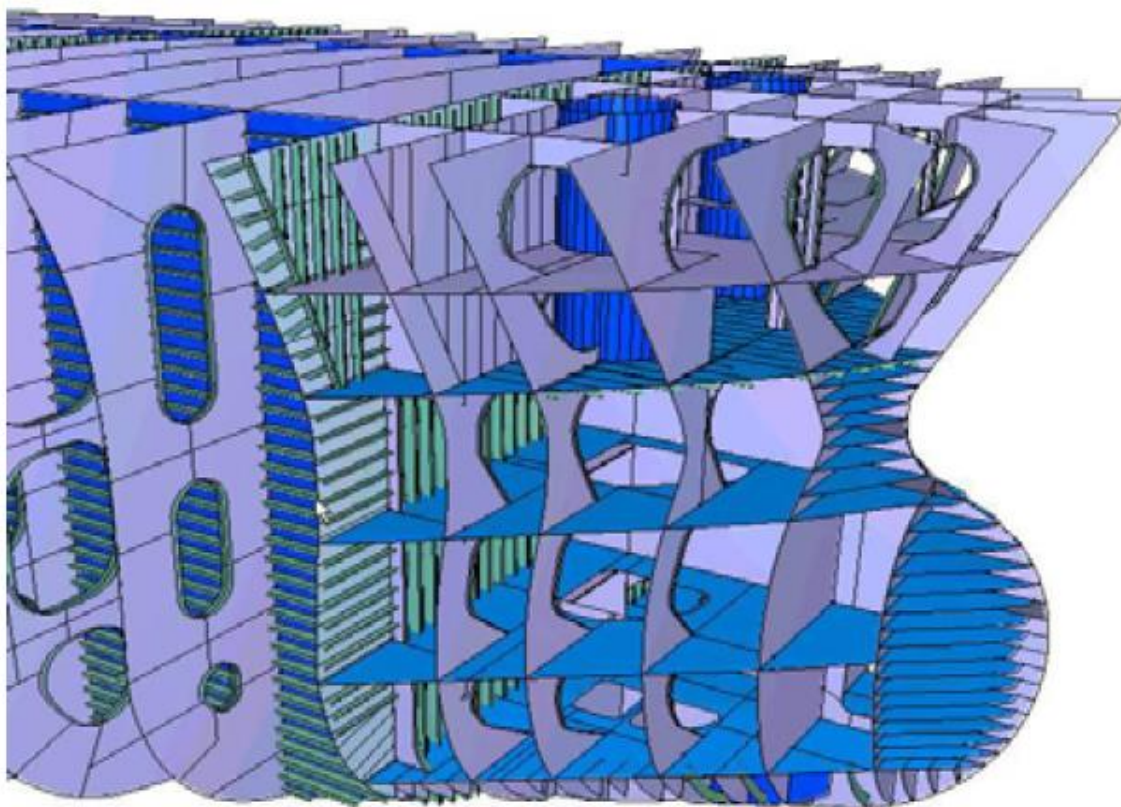
Pod nepropusnim se pregradama smatraju pregrade koje sudjeluju u vodonepropusnom pregrađivanju. Osnovne se vodonepropusne pregrade postavljaju bezuvjetno prema pravilima klasifikacijskih društava.

Dijelimo ih na :

- sudarna pregrada
- pregrada statvene cijevi
- pregrade skladišnog prostora
- prednja pregrada strojarnice

2.2.1.1. Sudarna pregrada

Sudarna pregrada odjeljuje pramčani pik od ostatka broda. Na trgovačkim brodovima sudarna pregrada odjeljuje pramčani pik i skladišni prostor. Smještaj sudarne pregrade definiran je prema pravilima i propisima klasifikacijskih društava koja propisuju smještaj na udaljenosti između $0.05 L$ i $0.09 L$ od pramčane okomice. Slika 1 prikazuje pregradu pramčanog pika.

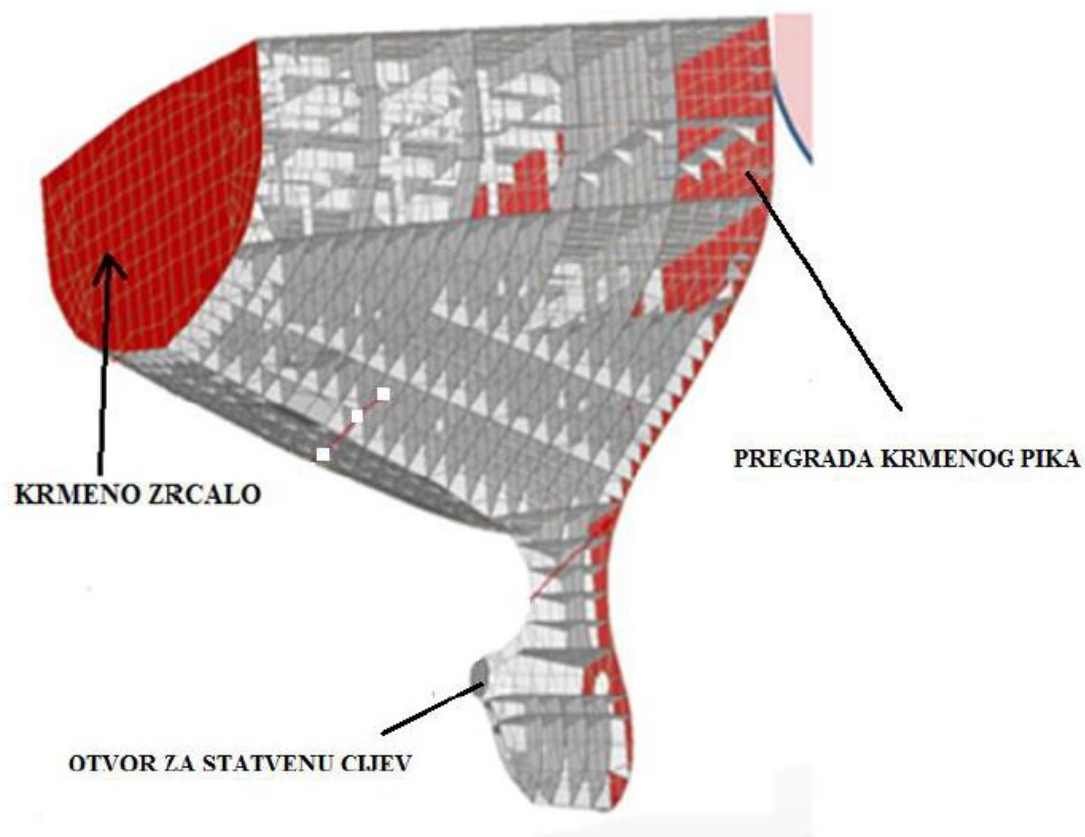


Slika 1. Sudarna pregrada broda pune forme [1]

Sudarna pregrada se mora protezati do palube nadvođa. Na brodovima s neprekinutim ili dugim nadgrađem sudarna pregrada se mora prostirati do prve palube iznad palube nadvođa. Otvori sa nepropusnim zatvaranjem mogu se nalaziti na sudarnoj pregradi iznad palube nadvođa. Na sudarnoj pregradi između palube nadvođa i pokrova dvodna ne smiju se postaviti vrata, provlake, prilazni otvori ili ventilacijski kanali.

2.2.1.2. Pregrada statvene cijevi

Svi brodovi moraju imati pregradu statvene cijevi. Pregrada statvene cijevi se mora protezati do palube nadvođa ili do nepropusne platforme koja se nalazi iznad teretne vodne linije. Pregrada statvene cijevi mora biti pojačana u području prolaza statvene cijevi.



Slika 2. Pregrada statvene cijevi (krmenog pika) [1]

2.2.1.3. Pregrade skladišnog prostora

Pregrade skladišnog prostora mogu biti smještene uzdužno i poprečno. Uzdužne pregrade doprinose uzdužnoj čvrstoći (osim vertikalno korugiranih uzdužnih pregrada) i najčešće ih nalazimo na brodovima koji prevoze tekući teret. Broj poprečnih i uzdužnih pregrada skladišnog prostora definiran je propisima klasifikacijskih društava.

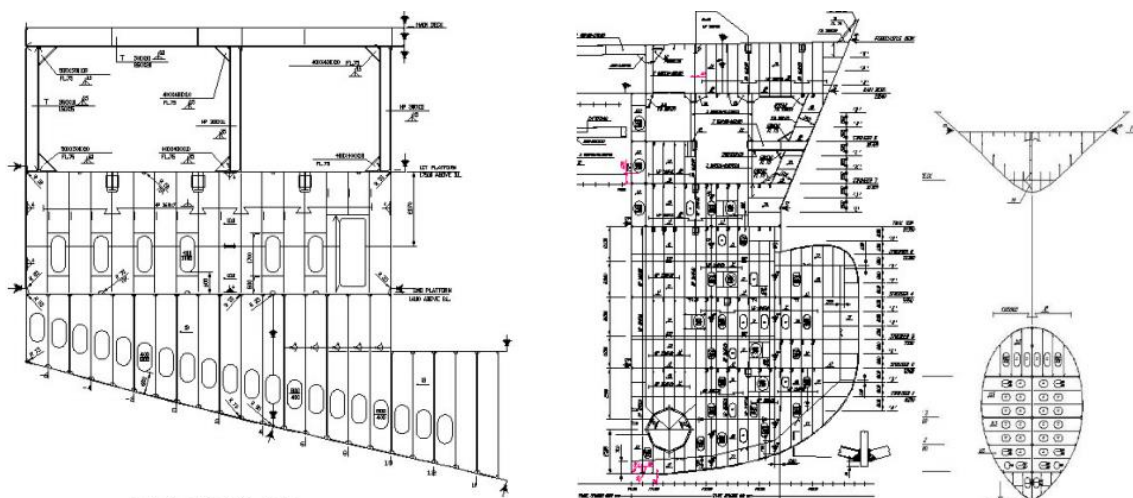
Broj poprečnih i uzdužnih pregrada proporcionalan je dimenzijama broda. Sve pregrade skladišnog prostora moraju biti naslonjene na rebrenice jer se tako osigurava kontinuitet strukture i pravilan prijenos opterećenja.

2.2.1.4. Ostale nepropusne pregrade

Ostale nepropusne pregrade, ovisno o vrsti broda, moraju se također protezati do palube nadvođa. Nepropusne pregrade se, gdje je god to moguće, postavljaju u ravnini rebara. Ako se izvode stepeničasto, svi dijelovi moraju biti nepropusni.

2.2.2. Propusne pregrade

Jedina vrsta propusnih pregrada koje susrećemo na brodskoj konstrukciji su pljuskače. Smještene su u pramčanim i krmenim pikovima, Slika 3. Zadaća pljuskača je sprječavanje 'sloshinga', tj. efekta slobodnih površina u pramčanom i krmenom tanku. Okomito se postavljaju na sredini tanka. Postotak otvora u odnosu na čitavu površinu pljuskače ne smije biti veći od 10% niti manji od 6%. Debljina lima pljuskače je u pravilu ekvivalentna sa najtanjom pregradom na brodu.



Slika 3. Pljuskače u krmenom i pramčanom piku [2]

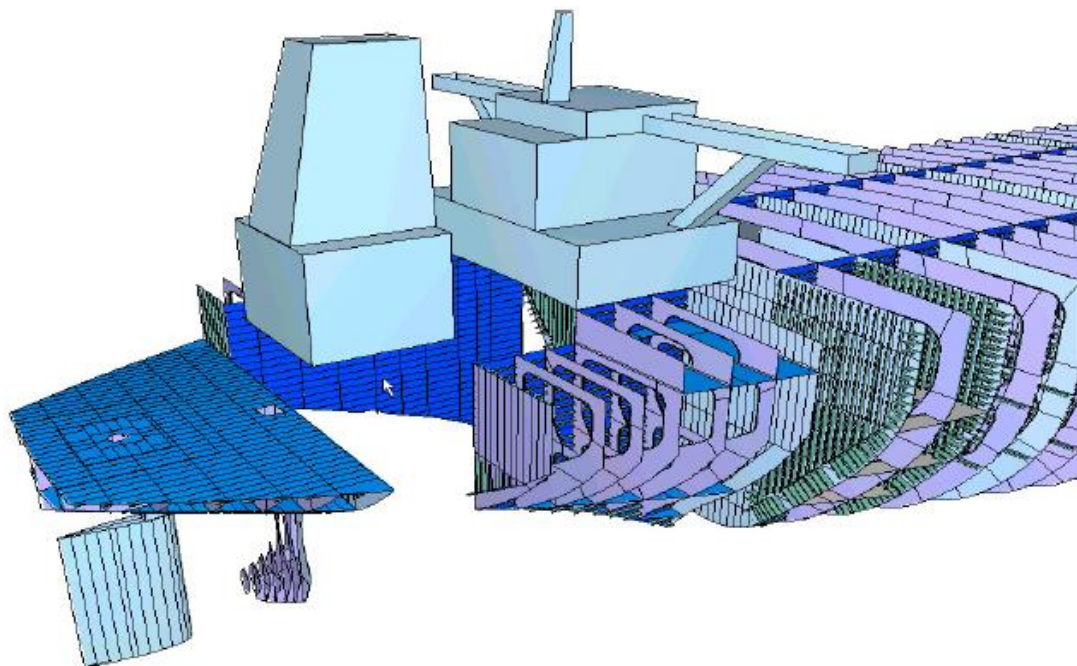
2.3. Konstrukcija nepropusnih pregrada

2.3.1. Pregrade sa ravnim opločanjem i s ukrepama

Ukrepe na pregradama s ravnim opločanjem mogu biti vodoravne ili uspravne. Za postavljanje ukrepa vrijede preporuke: ukrepe treba postavljati uspravno ako je visina pregrade manja od širine, a vodoravno ako je širina manja od visine. Na trgovačkim brodovima s poprečnim orebrenjem, obično se postavljaju uspravne ukrepe, budući da su visine skladišta u međupalublju obično manje od širine. Sudarne pregrade i pregrade osovinskog voda su obično uske i visoke, zbog čega se najčešće ukrepljuju vodoravnim ukrepama. Kod brodova s uzdužnim orebrenjem bokova, vodoravne ukrepe pregrada se postavljaju u istom razmaku kao i uzdužnjaci s kojima se povezuju koljenima. Uspravne ukrepe pregrada u tankovima za tekući teret omogućuju lakše čišćenje tankova.

Razmak ukrepa sudarnih pregrada je 600 mm, a ostalih pregrada je 750 – 900 mm.

Ovisno o omjeru širine pregrade prema visini pregrade, mogu se ugrađivati nosači. Ako je širina veća od dvostruke visine, nije potrebno ugrađivati dodatne poprečne nosače, koji se tada prostiru od boka do boka. Ako je širina manja od dvostruke visine, ugrađivanje dodatnih poprečnih nosača je povoljno jer dovodi do ušteda u težini. Ukrepljenje pregrada se postavlja na onoj strani na kojoj je jednostavnije čišćenje tankova. Ako to nije bitno, ukrepljenje se postavlja prema sredini broda, radi lakše montaže.



Slika 4. Ravne nepropusne pregrade od limova s ukrepljenjem u krmenom dijelu broda [1]

2.3.2. Pregrade od naboranih (korugiranih) limova

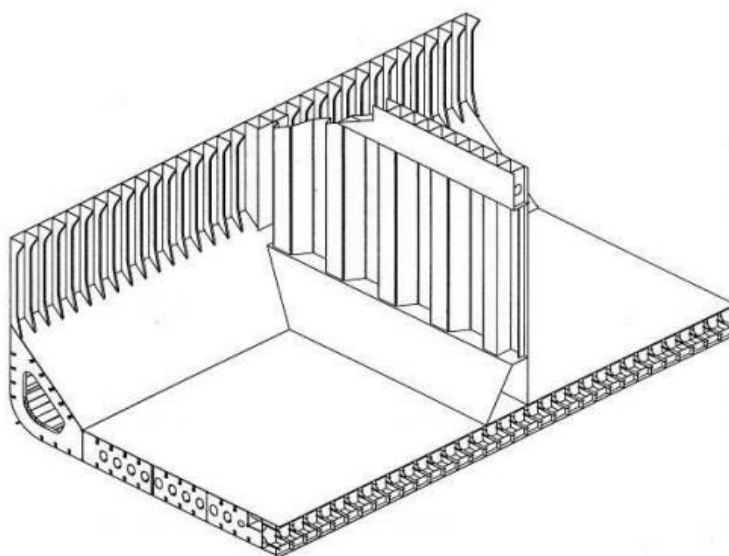
Žljebovi naboranih pregrada mogu biti vodoravni ili uspravni. Kod vodoravnih žljebova može se izvesti postupno povećanje debljine limova prema dnu, čime konstrukcija postaje nešto lakšom, ali takva konstrukcija lošije podnosi tlačna naprezanja koja se prenose na nju s palube i dna broda, pa je u praksi ustanovljen veliki broj oštećenja.

Uspravni žljebovi daju nešto veću težinu pregrada nego kada se ona izradi s vodoravnim žljebovima, ali ipak lakšu od strukture pregrade s ukrepama, međutim bolje podnose tlačna naprezanja. Slika 5 prikazuje primjer pregrade s uspravnim žljebovima.

Uzdužne pregrade tankera imaju redovito uzdužne vodoravne žljebove jer sudjeluju u uzdužnoj čvrstoći.

Stula, odnosno postolje se sastoji od kosih limova poduprtih uzdužnjacima i lima pokrova stule na koji se smješta pregrada. Unutrašnji prostor postolja ima pregrade koje mu osiguravaju veću čvrstoću. Vanjski, skošeni limovi postolja uvijek nasjedaju na rebrenice dvodna iz razloga da se očuva kontinuitet strukture, i to rezultira kontinuiranim prijenosom opterećenja, što je glavna postavka pri projektiranju svakog broda.

Prednosti naboranih pregrada su u tome što su lakše, jednostavnije ih je izvesti, lakše se čiste jer su glatke i olakšavaju rukovanje teretom. Nedostaci naboranih pregrada proizlaze iz tehnologije krivljenja ravnih limova na hladno u postupku izrade prešom u odgovarajućim kalupima, kada na mjestima pregiba dolazi do brže korozije. Ovaj se problem se rješava dobrim zaštitnim premazima, ili uglastim pregradama sastavljenih od zavarenih traka.



Slika 5. Poprečna vertikalno korugirana pregrada broda za tekuće terete sa strukturom oslonaca [1]

2.4. Opterećenja pregrada

Pregrade su opterećene okomito na svoju ravninu i to zbog:

- statičkog pritiska tereta ili balasta
- dinamičkog pritiska tereta ili balasta
- statičkog pritiska kod prodora vode
- dinamičkog pritiska tereta ili balasta kod sudara i nasukanja,

te u samoj ravnini pregrade zbog:

- hidrostatskog tlaka mora na vanjsku oplatu i palubu
- hidrodinamičkog tlaka mora na vanjsku oplatu i palubu
- dinamičkih pritisaka tereta ili balasta kod sudara i nasukavanja
- lokalnih koncentriranih tereta od opreme
- lokalnih koncentriranih sila pri dokovanju.

Nepropusne pregrade su potpuno opterećene samo kod prodora vode. Sudarne pregrade i pregrade statvenih cijevi trebaju biti dovoljno čvrste da se ne deformiraju trajno pri prodoru vode kod sudara ili oštećenja. Pregrade tankova tereta ili balasta, izložene hidrostatskom tlaku, također ne smiju pretrpjeti trajne deformacije.

Kod brodova s velikim razmacima pregrada (*Oil - Bulk - Ore* brodovi), u plovidbi s tekućim teretom dolazi do velikih hidrodinamičkih tlakova zbog gibanja velikih masa tekućine, zbog čega se pregrade tih brodova provjeravaju na dinamičke tlakove.

2.5. Provjera nepropusnosti

U fazi gradnje broda, svi tankovi te nepropusne pregrade moraju proći test na nepropusnost vode. Postoji više načina kojim se provjerava nepropusnost. Danas se najviše koriste:

- mlaz vode pod tlakom koji iznosi 5 bara
- ultrazvučna kontrola kritičnih zavara
- tankovi tereta se pune vodom te se promatra okolna struktura broda.

3. IZRADA MATEMATIČKOG MODELA ZA DIMENZIONIRANJE NABORANE PREGRADE PREMA HARMONIZIRANIM PRAVILIMA (IACS CSR BC & OT)

U ovom poglavlju definirat će se sve formule koje se koriste za dimenzioniranje naborane pregrade prema harmoniziranim zajedničkim pravilima za projektiranje konstrukcije brodova za prijevoz rasutog tereta i tankera za prijevoz nafte. Temeljem navedenih pravila izrađen je programski kod matematičkog modela za projektiranje naborane pregrade unutar programskog paketa Excel, odnosno Visual Basic for Application, a u tekstu su navedene deklaracije funkcija koje implementiraju pojedinu formulu.

3.1. Opći zahtjevi

3.1.1. Konstrukcija pregrade

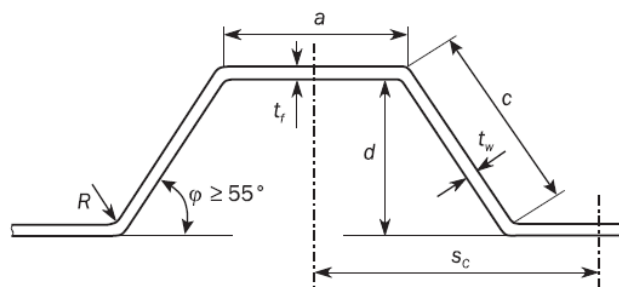
Zahtjevi definirani u ovom poglavlju mogu se primijeniti na uzdužne i poprečne pregrade, koje mogu biti ravne ili naborane [3].

3.1.2. Naborane pregrade

Za brodove visine 18 m i više, poprečne vertikalne naborane nepropusne pregrade trebale bi biti opremljene s donjom stulom, i općenito s gornjom stulom. Za brodove visine 16 m i više, poprečna vertikalna naborana nepropusna pregrada koja je izložena tlaku tekućine, npr. pregrade tanka i pregrade unutar balastnih tankova, trebale bi biti opremljene sa donjom stulom, i općenito sa gornjom stulom. Naborane pregrada se inače može protezati od dna do vrha tanka [3].

3.1.2.1. Konstrukcija

Glavne dimenzije a , R , c , d , t_f , t_w , s_c , korugirane pregrade prikazane su na Slika 6. Kut korugacije φ ne smije biti manji od 55° .



Slika 6. Dimenzije korugirane pregrade [3]

3.1.2.2. Minimalna dubina korugacije

Prema [3] (*Part1, Chapter3, Section 6 10.4.3*) minimalna dubina korugacije d računa se prema (1):

Dubina korugacije d , ne smije biti manja od (1):

$$d = \frac{1000lc}{C}, \text{ mm} \quad (1)$$

gdje je:

lc : Visina pregrade.

C : Koeficijent definiran kao:

$C=15$ za tankove sa tekućinom i balastne tankove.

$C=18$ za tankove suhog tereta.

Jednadžba (1) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

`Function Calc_d_min(lc As Double, c_11 As Double) As Double.`

3.1.2.3. Dubina korugacije prema odabranim parametrima

Dubine korugacije koja ovisi o geometriji naborane pregrade računa se prema (2):

$$d = \sin(\varphi)c, \text{ mm} \quad (2)$$

Jednadžba (2) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

`Function Calc_d(fi As Double, c As Double).`

Jednadžba (2) mora zadovoljiti uvjet koji je definiran jednadžbom (1).

3.1.2.4. Duljina korugacije

Duljina jedne korugacije naborane pregrade računa se prema (3):

$$s_c = a + c \cos(\varphi), \text{ mm} \quad (3)$$

Jednadžba (3) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

```
Function Calc_sc(a As Double, c As Double, fi As Double) As Double..
```

Nakon izračunate duljine korugacije provjerava se ukupna duljina pregrade.

Duljina pregrade se računa po sljedećoj formuli (4):

$$l_{blk} = 2n_{corr}s_c, \text{ mm} \quad (4)$$

Nakon izračunate duljine pregrade, vrši se provjera da li pregrada može stati unutar širine tanka. Provjera se vrši prema (5):

$$(l_{blk} + 2s_c) > b, \text{ mm} \quad (5)$$

Ukoliko je izraz u zagradi veći od b , računa se ostatak δ koji mora biti manji od dimenzije a naborane pregrade, Slika 6. Ako je δ veći od a , pregrada se nastavlja na sljedeću korugaciju.

$$\delta = b - l_{blk}, \text{ mm} \quad (6)$$

Zadovoljenje ograničenja (6) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

```
Function Calc_g(c As Double, d As Double).
```

Provjera podobnosti se računa prema (7):

$$g = \frac{C - D}{C + D}, -1 \leq g \leq 1 \quad (7)$$

gdje je:

C : Izdržljivost

D : Zahtjev

g : Parametar podobnosti

Parametar podobnosti g je rangiran između vrijednosti -1 do +1. Granični slučajevi su:

$g \rightarrow 1$ ako $D \rightarrow 0$; $g \rightarrow -1$ ako $C \rightarrow 0$

Parametar je zadovoljen ako se g nalazi između 0 i 1, odnosno nije zadovoljen za g je manji od 0. Ovaj parametar podobnosti treba razlikovat od parametra podobnosti definiranog u poglavlju 5.3.

3.1.2.5. Stvarni moment otpora korugacije

Prema [3] (*Part1, Chapter3, Section6 10.4.4*) moment otpora korugacije se računa prema (8):

$$Z = \left[\frac{d(3at_f + ct_w)}{6} \right] 10^{-3}, \text{ cm}^3 \quad (8)$$

gdje je:

t_f, t_w : Debljine oplata korugacije, mm, Slika 6.

d, a, c : Dimenzije korugacije, mm, Slika 6.

Jednadžba (8) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

```
Function Calc_Z_CorrugBulk(d As Double, a As Double, tf As Double, c As Double, tw As Double) As Double.
```

Gdje kontinuitet strukture na krajevima pregrade nije osiguran, moment otpora korugacije se računa prema (9):

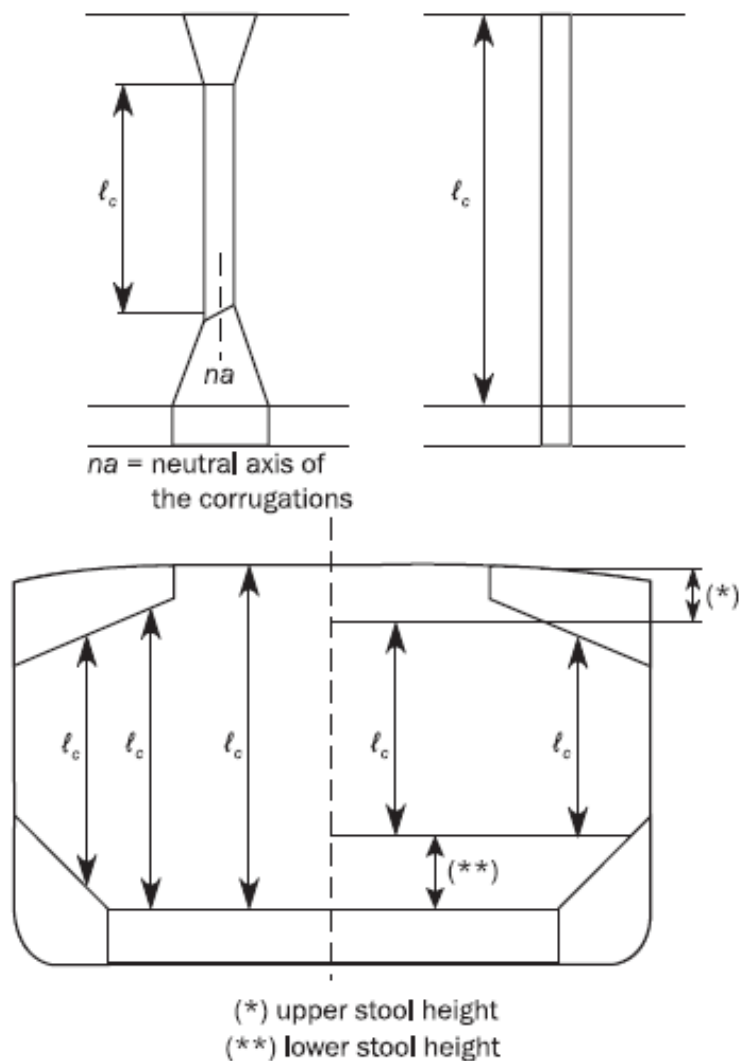
$$Z = 0,5at_f d 10^{-3}, \text{ cm}^3 \quad (9)$$

Jednadžba (9) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

```
Function Calc_z_web(a As Double, t_a As Double, d As Double) As Double.
```

3.1.2.6. Raspon korugacije

Raspon l_c korugacije se uzima kao duljina prikazana na Slika 7.



Slika 7. Raspon korugacije [3]

3.1.2.7. Oslonci krajeva pregrade

Kontinuitet čvrstoće mora biti osiguran na krajevima naboranih pregrada.

Ako je pregrada opremljena s donjom stulom, rebrenice i uzdužni nosači trebaju biti postavljeni u liniji s obje strane donje stule. Ako pregrada nije opremljena s donjom stulom, rebrenice i uzdužni nosači trebaju biti postavljeni u liniji s obje prirubnice vertikalne naborane poprečne pregrade. Podupiruće rebrenice i uzdužni nosači trebaju biti međusobno spojeni s pogodno projektiranim smičnim pločama.

Ispod palube, ako nema gornje stule, poprečne ili uzdužne ukrepe bi trebali biti postavljene u liniji s prirubnicama korugacije.

3.2. Lokalne dimenzije trupa

3.2.1. Minimalna debljina oplata pregrade

Prema [3] (*Part1, Chapter6, Section3 1.1.1*) minimalna debljina oplata pregrade unutar tanka računa se prema (10):

$$t_{\min} = 4,5 + 0,02L_2, \text{ mm} \quad (10)$$

Jednadžba (10) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

Function Calc_t_min(l As Double) As Double.

3.2.2. Oplata izložena bočnom (latelarnom) tlaku

3.2.2.1. Oplata naborane pregrade

Prema [3] (*Part1, Chapter6, Section4 1.2.1*) debljina oplata, t , bilo da se računa za duljinu prirubnice ili za duljinu struka ne smije biti manja od vrijednosti dobivene prema (11):

$$t = 0,0158b_p \sqrt{\frac{|P|}{C_{CB}R_{eH}}}, \text{ mm} \quad (11)$$

gdje je:

b_p : duljina oplata naborane pregrade

: $b_p = a$ duljina oplata prirubnice, mm, Slika 6.

: $b_p = c$ duljina oplata struka, mm, Slika 6.

C_{CB} : dopušteni koeficijent savijanja za oplatu naborane pregrade koji je jednak:

- Za prihvaćanje AC – S kriterija za poprečne naborane pregrade i vertikalno naborane horizontalne pregrade

$$C_{CB}=0,75.$$

- Za prihvaćanje AC – SD kriterija za poprečne naborane pregrade i vertikalno naborane horizontalne pregrade

$$C_{CB}=0,9.$$

Jednadžba (11) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijama:

```
Function Calc_t_a(p_low As Double, Ccb As Double, ReH As Double, a As Double) As Double.
```

```
Function Calc_t_c(p_low As Double, Ccb As Double, ReH As Double, c As Double) As Double.
```

3.3. Zahtjevi za pregrade tankera

3.3.1. Primjena

Uz zahtjeve navedene u općem dijelu, vertikalne naborane pregrade tankera za prijevoz nafte moraju ispuniti uvjete koji će biti navedeni u nastavku [3].

3.3.2. Debljina oplata po visini

Debljina oplata izračunata po 3.3.3 i 3.3.4 trebala bi biti održana na dvije trećine duljine korugacije l_{cg} , donjeg dijela pregrade. Iznad toga, debljina oplata se može smanjiti za 20% od zahtijevane debljine prema 3.3.3 od srednjeg dijela korugacije pod pretpostavkom da je moment otpora gornjeg dijela pregrade u skladu s 3.3.4 [3].

3.3.3. Debljina struka pregrade po visini

Prema [3] (*Part2, Chapter2, Section3 2.2.2*) debljina struka donjih 15% pregrade, t_w , se uzima kao najveća vrijednost izračunata za sva moguća primjenjiva stanja krca. Ovaj zahtjev nije primjenjiv za naborane pregrade bez donje stule. Debljina se računa prema (12):

$$t_w = \frac{1000 |Q_{cg}|}{d_{cg} C_{t-cg} \tau_{eH}}, \text{ mm} \quad (12)$$

gdje je:

Q_{cg} : Projektna smična sila nametnuta na struk oplata na donjem dijelu korugacije

$$Q_{cg} = \frac{s_{cg} l_{cg} |3P_l + P_u|}{8000}, \text{ kN} \quad (13)$$

P_l : Projektni tlak na donjem dijelu naborane pregrade, kN/m².

P_u : Projektni tlak na gornjem dijelu naborane pregrade, kN/m².

d_{cg} : Dubina korugacije, u mm, Slika 8.

C_{t-cg} : Dopušteni koeficijent smičnog naprezanja

$C_{t-cg} = 0,75$ za prihvatanje AC – S kriterija.

$C_{t-cg} = 0,90$ za prihvatanje AC – SD kriterija.

Tlakovi P_l i P_u su preuzeti iz već postojećeg modela.

Jednadžba (12) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

```
Calc_t_w(Q_cg As Double, d As Double, Ccb As Double, taueh As Double) As Double.
```

Jednadžba (13) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

```
Calc_Q_cg(sc As Double, lc As Double, p_low As Double, p_up As Double) As Double.
```

Prema [ref] (*Part1, Chapter1, Section4 2.2.1*) vrijednost τ_{eH} koja se koristi u jednadžbi (12) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

```
Function Calc_tau_eh(ReH As Double) As Double.
```

3.3.4. Debljina prirubnice po visini naborane pregrade

Prema [3] (*Part2, Chapter2, Section3 2.2.2*) debljina prirubnice naborane pregrade, t_f , za dvije trećine korugacije donjeg dijela pregrade se uzima kao najveća vrijednost izračunata za sva moguća primjenjiva stanja krcanja. Ovaj zahtjev nije primjenjiv za naborane pregrade bez donje stule. Debljina se računa prema (14):

$$t_f = \frac{6,57b_{f-cg} \sqrt{\sigma_{bdg-max}}}{C_f} 10^{-3}, \text{ mm} \quad (14)$$

gdje je:

$\sigma_{bdg-max}$: Maksimalna vrijednost vertikalnog savojnog naprezanja u prirubnici. Savojno naprezanje se računa na donjem dijelu i na sredini naborane pregrade.

$$\sigma_{bdg-max} = \frac{M_{cg}}{Z_{cg-act}} 10^3, \text{ N/mm}^2 \quad (15)$$

M_{cg} : Vertikalni moment savijanja.

Z_{cg-act} : Stvarni moment otpora an donjem i srednjem dijelu naborane pregrade.

b_{f-cg} : Duljina prirubnice oplata, u mm, Slika 8.

b_{w-cg} : Duljina struka oplata, u mm, Slika 8.

C_f : Koeficijent koji se uzima kao:

$$C_f = 7,95 - 0,26 \left(\frac{b_{w-cg}}{b_{f-cg}} \right)^2 \quad (16)$$

Jednadžba (14) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

```
Function Calc_t_f(a As Double, MaxSigma As Double, cf As Double) .
```

Jednadžba (15) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

a) na donjem kraju pregrade:

```
Function Calc_sigma_bdg(M_cg As Double, Z_cg As Double) As Double.
```

b) na sredini naborane pregrade:

```
Function Calc_sigma_bdg1(M_cg1 As Double, Z_cg1 As Double) As Double.
```

Od dvije izračunate vrijednosti, u nastavku proračuna se uzima ona veća.

Jednadžba (16) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

```
Function Calc_cf(a As Double, c As Double) As Double.
```

3.3.5. Momemt otpora po visini naborane pregrade

Prema [3] (*Part2, Chapter2, Section3 2.2.4*) moment otpora na donjem i gornjem dijelu, i na sredini naborane pregrade ($l_{cg}/2$), se uzima kao najveća vrijednost izračunata za sva primjenjiva stanja krcanja prema (17):

$$Z_{cg} = \frac{1000M_{cg}}{C_{s-cg} R_{eH}}, \text{ cm}^3 \quad (17)$$

gdje je:

M_{cg} : Vertikalni moment savijanja

$$M_{cg} = \frac{C_i |P| s_{cg} l_0^2}{12000}, \text{ kNm} \quad (18)$$

P : Srednja vrijednost tlaka

$$P = \frac{P_u + P_l}{2}, \text{ kN/m}^2 \quad (19)$$

P_l, P_u : Projektni tlak za određeno stanje krcanja na donjem i gornjem dijelu naborane pregrade.

l_0 : Efektivni savojni raspon korugacije, u m, koji se mjeri od sredine visine donje stule do sredine visine gornje stule. Gdje gornja i donja stulna nisu postavljene l_0 se mjeri od vrha do dna tanka, Slika 8.

C_i : Koeficijent savojnog momenta prikazanog u Tablica 1.

C_{s-cg} : Koeficijent dopuštenog savojnog naprezanja na sredini visine naborane pregrade, l_{cg}

$C_{scg} = c_e$ ali ne veći od vrijednosti 0,75 za prihvatanje AC – S kriterija.

$C_{scg} = c_e$ ali ne veći od vrijednosti 0,90 za prihvatanje AC – SD kriterija.

Na donjem i gornjem kraju naborane pregrade:

$C_{s-cg} = 0,75$ za prihvatanje AC – S kriterija.

$C_{s-cg} = 0,90$ za prihvatanje AC – SD kriterija.

c_e : Koeficijent koji se uzima kao:

$$c_e = \frac{2,25}{\beta} - \frac{1,25}{\beta^2}, \text{ za } \beta \geq 1,25$$

$$c_e = 1, \text{ za } \beta < 1,25 \quad (20)$$

β : Koeficijent koji se uzima kao:

$$\beta = \frac{b_{f-cg}}{t_f} \sqrt{\frac{R_{eH}}{E}} \quad (21)$$

t_f : Debljina oplata prirubnice, u mm.

Jednadžba (17) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

a) za donji kraj pregrade:

```
Function Calc_Z_cg(M_cg As Double, Ccb As Double, ReH As Double) As Double.
```

b) za srednji dio pregrade:

```
Function Calc_Z_cg1(M_cg1 As Double, c_e As Double, ReH As Double) As Double.
```

c) za gornji kraj pregrade:

```
Function Calc_Z_cg2(M_cg2 As Double, Ccb As Double, ReH As Double) As Double.
```

na temelju tri različita momenta koja su dobivena jednačbom (18).

Jednačba (18) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

a) za donji kraj pregrade:

```
Function Calc_M_cg(c_1 As Double, p_low As Double, p_up As Double, sc As Double, l_0 As Double) As Double.
```

b) za srednji dio pregrade:

```
Function Calc_M_cg1(c_m1 As Double, p_low As Double, p_up As Double, sc As Double, l_0 As Double) As Double.
```

c) za gornji dio pregrade:

```
Function Calc_M_cg2(c_m1y As Double, p_low As Double, p_up As Double, sc As Double, l_0 As Double) As Double.
```

Jednačba (20) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

```
Function Calc_c_e(beta As Double, Ccb As Double) As Double.
```

Jednačba (21) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

```
Function calc_beta(a As Double, t_a As Double, ReH As Double, E As Double) As Double.
```

Tablica 1. Vrijednosti C_i

Pregrada	Na donjem kraju $l_{cg}-a$	Na sredini l_{cg}- a	Na gornjem kraju $l_{cg}-a$
Poprečna pregrada	C_1	C_{m1}	$0,65 C_{m1}$
Uzdužna prergada	C_3	C_{m3}	$0,65 C_{m3}$

gdje je:

C_1 :koeficijent koji se uzima kao:

$$C_1 = a_1 + b_1 \sqrt{\frac{A_{dt}}{b_{dk}}} \quad \text{ali ne manje od } 0,60$$

$$C_1 = a_1 - b_1 \sqrt{\frac{A_{dt}}{b_{dk}}} \quad \text{za poprečne pregrade bez donje stule, ne manje od } 0,55.$$
(22)

a_1 : Koeficijent koji se uzima kao:

$$a_1 = 0,95 - \frac{0,41}{R_{bt}} \quad (23)$$

$a_1 = 1$ za poprečne pregrade bez donje stule.

b_1 : Koeficijent koji se uzima kao:

$$b_1 = -0,20 + \frac{0,078}{R_{bt}} \quad (24)$$

$b_1 = 0,13$ za poprečne pregrade bez donje stule.

C_{m1} : Koeficijent koji se uzima kao:

$$C_{m1} = a_{m1} + b_{m1} \sqrt{\frac{A_{dt}}{b_{dk}}} \text{ ali ne manji od } 0,55. \quad (25)$$

$$C_{m1} = a_{m1} - b_{m1} \sqrt{\frac{A_{dt}}{b_{dk}}} \text{ za poprečne pregrade bez donje stule, ali ne manje od } 0,60.$$

a_{m1} : Koeficijent koji se uzima kao:

$$a_{m1} = 0,63 + \frac{0,25}{R_{bt}} \quad (26)$$

$a_{m1} = 0,85$ za poprečne pregrade bez donje stule.

b_{m1} : Koeficijent koji se uzima kao:

$$b_{m1} = -0,25 - \frac{0,11}{R_{bt}} \quad (27)$$

$b_{m1} = 0,34$ za poprečne pregrade bez donje stule.

Jednadžba (22) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

```
Function Calc_c_1(a_1 As Double, b_1 As Double, A_dt As Double, b_dk As Double, h_lst As Double) As Double.
```

Jednadžba (23) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

```
Function Calc_a_1(Rbt As Double, h_lst As Double) As Double.
```

Jednadžba (24) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

```
Function Calc_b_1(Rbt As Double, h_1st As Double) As Double.
```

Jednadžba (25) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

```
Function Calc_c_m1(a_m1 As Double, b_m1 As Double, A_dt As Double, b_dk As Double, h_1st As Double) As Double.
```

Jednadžba (26) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

```
Function Calc_a_m1(Rbt As Double, h_1st As Double) As Double.
```

Jednadžba (27) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

```
Function Calc_b_m1(Rbt As Double, h_1st As Double) As Double.
```

R_{bt} : Koeficijent koji se uzima kao:

$$R_{bt} = \frac{A_{bt}}{b_{ib}} \left(1 + \frac{l_{ib}}{b_{ib}} \right) \left(1 + \frac{b_{av-t}}{h_{st}} \right) \quad \text{za poprečne pregrade} \quad (28)$$

gdje je:

A_{dt} : Površina poprečnog presjeka gornje stule poprečne pregrade, u m², Slika 8.

A_{bt} : Površina poprečnog presjeka donje stule poprečne pregrade, u m², Slika 8.

b_{av-t} : Prosječna širina donje stule poprečne pregrade, u m, Slika 8..

h_{st} : Visina donje stule poprečne pregrade, u m, Slika 8.

h_{sl} : Visina gornje stule poprečne pregrade, u m, Slika 8.

b_{ib} : Širina na dnu tanka između donjih balastnih tankova, ili između balastnog tanka i donje stule na sredini broda, Slika 8.

l_{ib} : Duljina tanka na dnu na gornjem dijelu dvodna između donjih poprečnih stula, u m, Slika 8.

Jednadžba (28) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

```
Function Calc_Rbt(A_bt As Double, b_ib As Double, l_ib As Double, b_avt As Double, h_1st As Double) As Double.
```

Površina poprečnog presjeka gornje stule A_{dt} , je u kod implementirana preko funkcije:

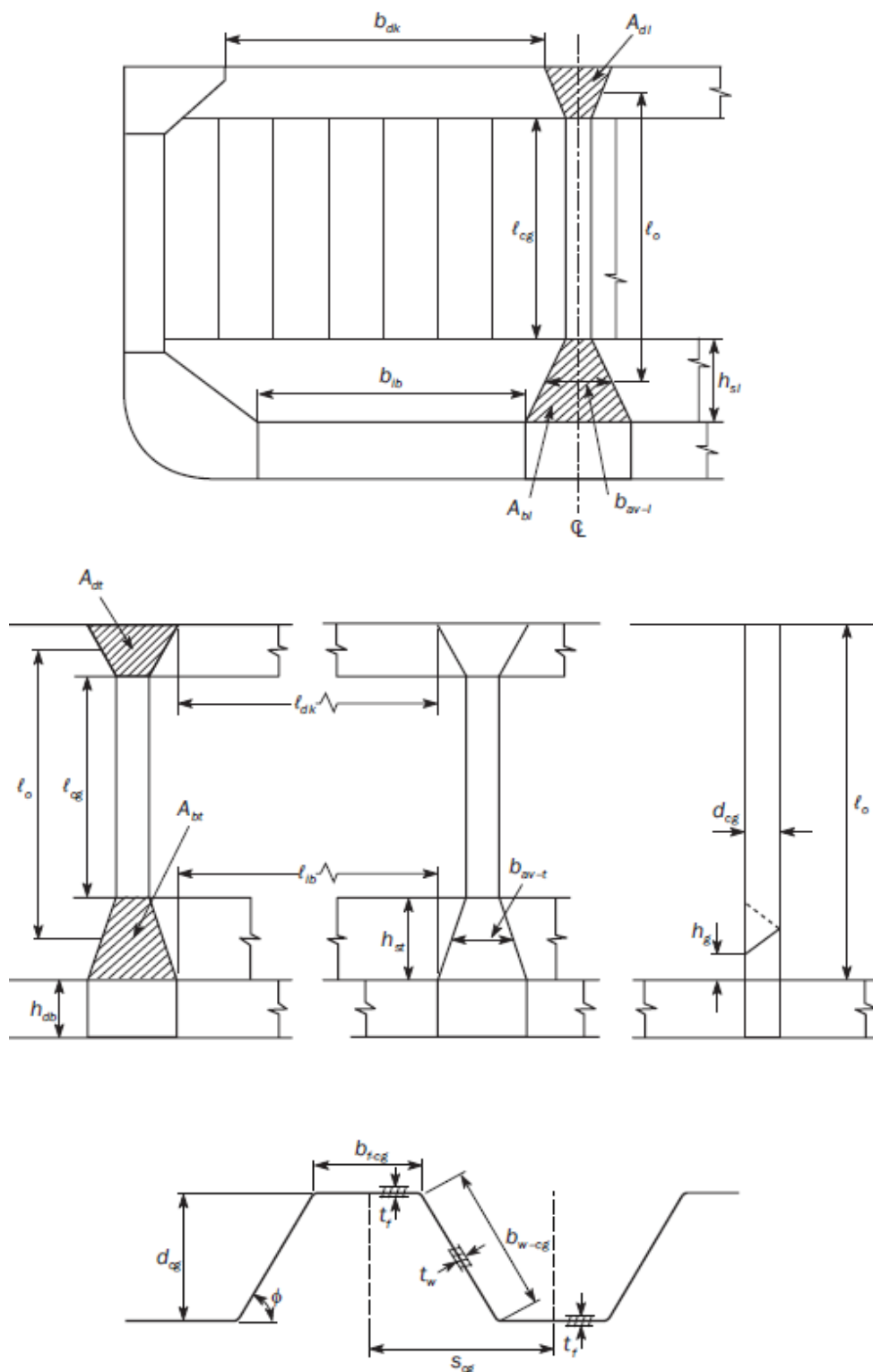
```
Function calc_A_dt(d As Double, base_ust As Double, h_ust As Double) As Double.
```

Površina poprečnog presjeka donje stule A_{bt} , je u kod implementirana preko funkcije:

```
Function calc_A_bt(d As Double, base_1st As Double, h_1st As Double) As Double.
```

Prosječna širina donje stule poprečne pregrade b_{av-t} , je u kod implementirana preko funkcije:

Function calc_b_avt(d As Double, base_1st As Double) As Double.



Slika 8. Definicija parametara naborane pregrade (tankeri s uzdužnom pregradom na sredini broda) [3]

3.4. Korozijska

Prema [3] (Part1, Chapter3, Section3 1.2.1) dodatak za korozijsku računa se prema (29):

$$t_c = \text{Roundup}_{0,5}(t_{c1} + t_{c2}) + 0,5 \quad , \text{ mm} \quad (29)$$

Jednadžba (29) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

```
Function Calc_t_cor_tot(t_cor_s1 As Double, t_cor_s2 As Double, t_cor_res As Double) As Double.
```

Na kraju je konačna debljina najveća vrijednost izračunata prema prethodnim formula uz još dodatak za korozijsku.

Tablica 2. Dodatak zbog korozijske [3]

Compartment type	Structural member		t_{c1} or t_{c2}				
			oil tankers	BC-A or BC-B ships with $L \geq 150$ m	Other BC ships		
Ballast water tank, bilge tank, drain storage tank, chain locker (a)	Face plate of PSM	Within 3m below top of tank (4)	2.0				
		Elsewhere	1.5				
	Other members (a)	Within 3m below top of tank (4)	1.7				
		Elsewhere	1.2				
Cargo oil tank	Face plate of PSM	Within 3m below top of tank (4)	1.7	N/A			
		Elsewhere	1.4				
	Inner-bottom plating/bottom of tank		2.1				
	Other members	Within 3m below top of tank (4)	1.7				
		Elsewhere	1.0				
		Dry bulk cargo hold (a)				2.4	1.0
Dry bulk cargo hold (a)	Transverse bulkhead	Upper part (6)	N/A	2.4	1.0		
		Lower stool: sloping plate, vertical plate and top plate (7)		5.2	2.6		
		Other parts		3.0	1.5		
	Sloped plating of hopper tank, inner bottom plating			3.7	2.4		
	Other members	Upper part (6)		1.8	1.0		
		Webs and flanges of the upper end brackets of side frames of single side bulk carriers					
		Webs and flanges of lower brackets of side frames of single side bulk carriers				2.2	1.2
		Other parts				2.0	1.2
Exposed to atmosphere	Weather deck plating		1.7				
	Other members		1.0				
Exposed to seawater	Shell plating between the minimum design ballast draught waterline and the scantling draught waterline		1.5				
	Shell plating elsewhere		1.0				
Fuel and lube oil tank			0.7				
Fresh water tank			0.7				
Void spaces (a)	Spaces not normally accessed, e.g. access only via bolted manhole openings, pipe tunnels, inner surface of stool space not common with a dry bulk cargo hold or ballast cargo hold, etc.		0.7				
Dry spaces	Internals of machinery spaces, pump room, store rooms, steering gear space, etc.		0.5				

3.5. Ukupna masa naborane pregrade

Ukupna masa pregrade se računa prema (30):

$$W = 2(a + c)t_{kon}N_{corr}l_c\rho_{steel} + \delta t_{kon}l_c\rho_{steel}, t \quad (30)$$

Jednadžba (30) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

```
Function Calc_Corrug_Bulk_Weight(a As Double, c As Double, t
As Double, lc As Double, ro As Double, ncorr As Double, delta
As Double) .
```

3.6. Ukupna cijena izrade naborane pregrade

Ukupna cijena izrade naborane pregrade definirana je prema (31):

$$C_{TOT} = P_a W + (N_{corr} + 1)l_c P C_{s1} + N_{corr}l_c P C_{s2}, \text{ €} \quad (31)$$

Jednadžba (31) je u programski kod matematičkog modela implementirana funkcijom:

```
Function Calc_Corrug_Bulk_Cost(p_a As Double, w As Double,
ncorr As Double, lc As Double, p_s As Double, c_s1 As Double,
C_s2 As Double) .
```

4. IZRADA OPTIMIZACIJSKOG MODELA ZA DIMENZIONIRANJE NABORANE PREGRADE NA ODABRANOM PRIMJERU

U Tablica 3 prikazane su glavne dimenzije promatranog tankera u kojem se nalazi naborana pregrada.

Tablica 3. Glavne dimenzije broda

Dimenzije	Simbol	Vrijednost	Mjerna jedinica
Mjerna duljina broda	L	185,2	m
Duljina između perpendikulara	L_{pp}	187,30	m
Širina broda	B	32,20	m
Visina broda	D	17,8	m
Gaz na ljetnoj vodnoj liniji	T	12,5	m
Gaz u maksimalnom balastu	T_{bal}	6,8	m
Projektni gaz (<i>scantling</i>)	T_{sc}	12,5	m
Istisnina na gasu T	D	51773	t
Istisnina	DWT	15,00	t
Koeficijent punoće	C_b	0,8373	
Maksimalna brzina	V_{max}	15,20	kn

Slika 9 prikazuje dio grafičkog sučelje razvijenog matematičkog modela u programskom paketa Excel koji služi za unos osnovnih podataka o brodu i projektiranoj pregradi.

Parameter	Value	Comment
L	185.2	m
B	13550	mm
h_tank	16.18	m
Cargo type:	Tank and Water Balast	
Material	AH36	
Criteria (Ccb)	AC-SD	
h_lst	2.82	m
h_ust	2.83	m
base_lst	1.6	m
base_ust	1.6	m
t_cor	1	mm
t_cor_res	0.5	mm
C_b	0.8373	
D	17.8	
b_ib	11.2	
l_ib	23.8	
b_dk	11.2	
l_0	13.355	
Cost model parameters		
Ps	20	cost/hour
Cs1	1.2	hour/m
Cs2	0.8	hour/m

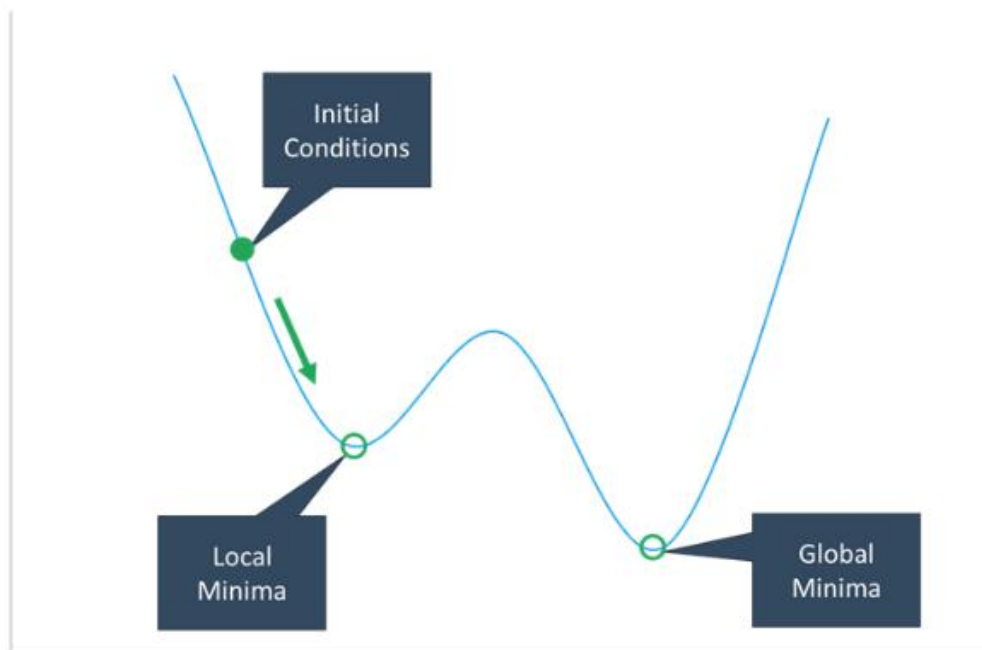
Slika 9. Dio grafičkog sučelje razvijenog matematičkog modela za unos osnovnih podataka o projektiranoj pregradi

4.1. Optimizacijska metoda

Većina optimizacijskih metoda je numeričko – iterativnog tipa te zahtjeva uporabu računala. Optimizacijski postupak uvodi sistematsku metodologiju određivanja vrijednosti projektnih varijabli koje minimiziraju ili maksimiziraju zadanu mjeru kvalitete i istovremeno zadovoljavaju projektna ograničenja. Projektni parametri uključuju projektne varijable koje su definirane unutar tzv. profila zadatka. Mjere kvalitete definirane su pomoću skupa funkcija preslikavanja, a neke tipične kriterijske funkcije su: minimalna cijena, minimalna masa, itd. Projektni prostor je prostor omeđen projektnim varijablama. Svaki projekt je predstavljen točkom unutar tog prostora. Ti projekti moraju zadovoljiti dani skup funkcija ograničenja (npr. dozvoljena naprezanja, kutovi izvijanja, dozvoljeni progibi, itd.). Funkcije cilja su atributi minimalne mase i minimalne cijene izrade [4].

Za optimizaciju je korišten Excel-ov rješavač tzv. *Solver*, koji koristi nelinearnu metodu generaliziranog redukcijuskog gradijenta (GRG). Najjednostavnije rečeno, ova metoda računa gradijent ili nagib funkcije cilja dok se ulazni podaci odnosno varijable mijenjaju, te određuje optimalno rješenje kada su parcijalne derivacije jednake nuli.

Jedan od nedostataka ove metode je da je optimalno rješenje jako ovisno o početnim vrijednostima i možda ne računa globalno optimalno rješenje. *Solver* će se najvjerojatnije zaustaviti na lokalnom optimumu koji je najbliži početnim vrijednostima, dajući rješenje koje može, ali i ne mora biti globalni optimum [5].



Slika 10. GRG nelinearna metoda [5]

Dodatan zahtjev da GRG solver ponudi dobro rješenje jest da funkcija mora biti kontinuirana. Bilo kakav diskontinuitet uzrokovat će probleme u algoritmu. Problem traženja globalnog optimuma se rješava s dodavanjem više startnih točaka što nam solver dozvoljava. Algoritam stvara slučajno raspoređenu populaciju početnih točaka koje se zasebno ocjenjuju. Korištenjem više početnih točaka, postoji puno veća šansa za pronalazak rješenja koje će biti globalni optimum [5].

4.2. Definicija optimizacijskog problema

U diplomskom radu je provedena strukturna optimizacija naborane pregrada tankera za prijevoz nafte s ciljem minimizacije mase i ukupnog troška izrade. Korišten je program Excel, dok je kao optimizacijska metoda primijenjen GRG (Generalizirani Redukcijski Gradijent) nelinearna metoda.

Projektne varijable su duljina prirubnice, duljina struka, te kut korugacije. Projektne varijable koje se odnose na duljinu variramo u rasponu od 500 – 2000 milimetara, dok kut korugacije variramo u rasponu od 55 – 90 stupnjeva, prikazano u .

Tablica 4. Raspon projektnih varijabli

Varijable	Min	Max
$\Phi, ^\circ$	55	90
$a, \text{ mm}$	500	2000
$c, \text{ mm}$	500	2000

Projektna ograničenja su faktori podobnosti konstrukcije prikazana jednadžbom (7).

Prvo ograničenje g_{dmin} koju konstrukcija pregrade mora zadovoljiti jest da geometrijski izračunati d ne smije biti manji od d_{min} prema (2).

Drugo ograničenje g_{delta} je vezano uz duljinu naborane pregrade. Provjerava se koliko ukupno stane korugacija unutar širine tanka, odnosno ostatak δ koji ostaje sa svake strane naborane pregrade do dvoboka prema (3).

Treće ograničenje g_{maxc} je vezano za duljinu baze stula, tj. ona ne može biti veća od duljine dubine korugacije d prema (6).

Slika 11 prikazuje dio grafičkog sučelje razvijenog matematičkog modela u programskom paketa Excel koji služi za definiciju optimizacijskog problema i na kojem je vidljiv upravo opisani optimizacijski problem.

Variables	Value	Min	Max		
$\phi, ^\circ$	56.7	55	90		Optimize
$a, \text{ mm}$	812.5	500	2000		Evaluate
$c, \text{ mm}$	839.9	500	2000		Random
					Graph
Objective	Value	Min	Max	Norm	wi
Weight	18.63	10	200	0.04542	1
Cost	12 606	10000	100000	0.02895	0
ObjFun	0.04542	0	1		
Constraint	Value	RHS	Type		
g_d_min	0.0000	0	>=		
g_delta	0.0000	0	>=		
g_deltac	0.3901	0	>=		

Slika 11. Dio grafičkog sučelje razvijenog matematičkog modela za definiciju optimizacijskog problema

4.3. Usporedba različitih optimalnih rješenja

U Tablica 5 prikazana su rješenja optimizacijskih problema s ciljem minimizacije mase i minimizacije cijene naborane pregrade. Kao što je vidljivo u ovom partikularnom slučaju oba optimizacijska problema imaju isto rješenje.

Tablica 5. Optimalna rješenja

No	$\Phi, ^\circ$	$a, \text{ mm}$	$c, \text{ mm}$	Masa pregrade, t	Cijena izrade, €	Materijal	Funkcija cilja
1	56,69	812,54	839,94	18,63	12605,55	AH - 36	Minimizacija mase
2	56,69	812,54	839,94	18,63	12605,55	AH - 36	Minimizacije cijene izrade

Tablica 6. Dimenzije optimalne pregrade

Osnovne dimenzije	
$\varphi, ^\circ$	56,6956998
$a, \text{ mm}$	616,580
$c, \text{ mm}$	839,948331
$d, \text{ mm}$	702
$s_c, \text{ mm}$	1077,8
$t_{net}, \text{ mm}$	10,5
N_{corr}	6
Materijal	AH - 36

4.4. Usporedba prototipne i optimalne pregrade

Dimenzije naborane pregrade koja se nalazi u prototipu prikazane su u Tablica 7.

Tablica 7. Dimenzije naborane pregrade u prototipu

Osnovne dimenzije	
$\varphi, ^\circ$	70,0170
$a, \text{ mm}$	1200
$c, \text{ mm}$	1170,469
$d, \text{ mm}$	1100
$s_c, \text{ mm}$	1600
$t_{net}, \text{ mm}$	18
N_{corr}	4
Materijal	AH - 36

Kada se gore navedene dimenzije i materijal unesu u izrađeni programski kod dobivamo masu i cijenu izrade prikazane u Tablica 8.

Tablica 8. Usporedba prototipne i optimalne pregrade

No	$\Phi, ^\circ$	$a, \text{ mm}$	$c, \text{ mm}$	Masa pregrade, t	Cijena izrade, €	Materijal	Funkcija cilja
1	70,01	1200	1170,469	29,33	18070	AH - 36	Minimizacija cijene izrade
2	56,69	812,34	839,94	18,63	12605,55	AH - 36	

Iz gore navedenih podatak možemo očitati uštedu u masi za oko 35 %, te uštedu u izradi pregrade za oko 30 %. Ovakva ušteda u masi značila bi puno više prostora za krcanje tereta i zaradu što je zapravo i konačan cilj svakog trgovačkog broda.



Slika 12. Geometrijski prikaz naborane pregrade u prototipu



Slika 13. Geometrijski prikaz optimalne pregrade

5. ANALIZA ČVRSTOĆE OPTIMALNE NABORANE PREGRADE METODOM KONAČNIH ELEMENATA

Naborana pregrada dobivena optimizacijom sa dimenzijama prikazanim u Tablica 6, unosi se u programski paket MAESTRO.

5.1. O metodi konačnih elemenata [6]

Metoda konačnih elemenata numerička je metoda koja je nezaobilazna u inženjerskim proračunima. Danas postoji velik broj računalnih programa temeljenih na toj metodi, koji omogućuju analizu konstrukcija bez razmatranja složene teorije koja opisuje fizikalno ponašanje konstrukcije. Njihovo korištenje nerijetko se svodi na zadavanje ulaznih podataka prema propisanim uputama, a dobivena rješenja, koja svojim grafičkim prikazom fasciniraju korisnike, prihvaćaju se bez dovoljno kritičnosti. Računalni program shvaća se kao crna kutija (*Black-Box*) u kojoj je skrivena složena teorija koja se smatra nepotrebnom za rješavanje inženjerskih problema. Takav pristup može dovesti do pogrešne procjene stanja naprezanja i deformacija u konstrukciji, a to može ugroziti njezinu čvrstoću i stabilnost.

Metoda konačnih elemenata približna je numerička metoda. Svaki njezin korisnik treba imati na umu da su dobivena rješenja približna, a realnim vrijednostima mogu se približiti samo uz pravilan izbor proračunskog modela i uz pravilno odabrane konačne elemente koji su u mogućnosti opisati realni proces deformiranja. Kako bi to bilo moguće, potrebno je razumjeti fizikalno ponašanje konstrukcije koja se analizira te poznavati teorijske osnove konačnih elemenata, a na taj način i ograničenje njihove primjene. Osim toga, korisnik mora biti u stanju kritički analizirati dobivene rezultate.

5.1.1. Računalni program MAESTRO

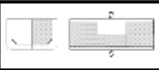

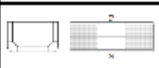
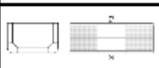
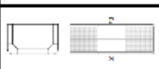


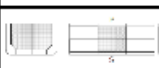
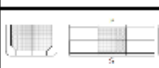
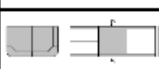
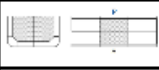


Maestro je računalni program namijenjen za analize velikih, složenih tankostijenih konstrukcija. Osim klasičnih strukturnih analiza, uključuje analize granične čvrstoće te optimizaciju konstrukcije. Program je dostupan u Windows okruženju te ima vrlo pristupačno grafičko sučelje. Najviše se koristi u brodograđevnoj industriji te je iz tog razloga olakšana izrada modela složenih brodskih konstrukcija uporabom podstrukture i modula. Model cijelog broda može se izraditi u vrlo brzom vremenskom roku.

5.2. Slučajevi opterećenja [3]

Slučajevi opterećenja su definirani prema IACS pravilima. Opterećenja su kombinacija valne komponente i stanja krcanja. Vanjski hidrostatički tlak i unutarnji statički tlak koji su nastali zbog tereta hidrostatički tlak i unutarnji statički tlak koji su nastali zbog tereta i balasta smatraju se kao poprečna opterećenja na mirnoj vodi. Vanjski hidrodinamički tlak i unutarnji inercijski tlak tereta i balasta čine poprečna opterećenja na valovima. Smična sila i moment savijanja na mirnoj vodi, odnosno smična sila i moment savijanja na valovima uzimaju se kao opterećenja konstrukcije trupa. Naprezanje nastalo zbog poprečnog opterećenja na valovima i opterećenje trupa međusobno se kombiniraju pomoću kombinacijskih faktora.

Sva stanja krcanja sa detaljnim opisom distribucije tereta prikazana su Tablica 9. Slučajevi opterećenja se razlikuju po načinu krcanja i broju popunjenih skladišta. Navedeni slučajevi opterećenja implementirani su u MAESTRO.

Tablica 9. Opis odabranih slučajeva opterećenja

Slučaj opterećenja	Obrazac opterećenja	Slika	Opterećenja na mirnoj vodi			Dinamički slučajevi opterećenja		GM [m]	$t_{\text{rest-avg}}$ [m]
			Gaz [m]	% of Perm. SWBM [kNm]	% of Perm. SWSF [kN]	Procjena čvrstoće	Procjena čvrstoće za smična naprezanja		
Projektna kombinacija opterećenja S + D (Slučajevi opterećenja u plovidbi)									
1	B1		0.9 T_w	100% (progib)	Act. shear force	Srednji dio broda	Srednji dio i krma broda	0.12 B	0.35 B
			11.25	-1051000	Pogledati bilješku 3	1	/	3.86	11.27
2	B1		0.9 T_w	100% (progib)	100% (-ve fwd)	Srednji dio broda	Srednji dio i krma broda	0.12 B	0.35 B
			11.25	1157000	-95000	2	/	3.86	11.27
3	B1		0.9 T_w	100% (progib)	100% (-ve fwd)	Srednji dio broda	Srednji dio i krma broda	0.12 B	0.35 B
			11.25	1157000	-95000	5a	/	3.86	11.27
4	B3		0.9 T_w	100% (progib)	100% (-ve fwd)	Srednji dio broda	Srednji dio i krma broda	0.12 B	0.35 B
			11.25	1157000	-95000	2	2	3.86	11.27
5	B3		0.9 T_w	100% (progib)	100% (-ve fwd)	Srednji dio broda	Srednji dio i krma broda	0.12 B	0.35 B
			11.25	1157000	-95000	5a	/	3.86	11.27
6	B3		0.9 T_w	100% (progib)	100% (-ve fwd)	Srednji dio broda	Srednji dio i krma broda	0.12 B	0.35 B
			11.25	1157000	-95000	6a	/	3.86	11.27
7	B4		0.6 T_w	100% (progib)	75% (+ve fwd)	Srednji dio broda	Srednji dio i krma broda	0.24 B	0.40 B
			7.5	-1051000	71250	1	/	7.73	12.880
8	B4		0.6 T_w	100% (progib)	75% (+ve fwd)	Srednji dio broda	Srednji dio i krma broda	0.24 B	0.40 B
			7.5	-1051000	71250	5a	/	7.73	12.88
9	B6		0.6 T_w	100% (progib)	100% (+ve fwd)	Srednji dio broda	Srednji dio i krma broda	0.24 B	0.40 B
			7.5	-1051000	95000	1	1	7.73	12.88
10	B6		0.6 T_w	100% (progib)	100% (+ve fwd)	Srednji dio broda	Srednji dio i krma broda	0.24 B	0.40 B
			7.5	-1051000	95000	5a	/	7.73	12.88
11	B7		$T_{\text{ball-on}}$	100% (progib)	100% (+ve fwd)	Srednji dio broda	Srednji dio i krma broda	LM	LM
			9.05	-1051000	95000	1	/	5.67	12.21
Projektna kombinacija opterećenja S (Slučajevi opterećenja za brod u luci)									
12	B8		1/3 T_w	100% (progib)	100% (+ve fwd)	Primjenjivo za procjenu čvrstoće u srednjem dijelu broda te za procjenu čvrstoće smičnih naprezanja	/	/	/
			4.17	-1994000	104300				
13	B9		1/3 T_w	100% (progib)	75% (+ve fwd)	Primjenjivo samo za procjenu čvrstoće srednjeg dijela broda	/	/	/
			4.17	-1994000	78225				
14	B11		T_w	100% (progib)	100% (-ve fwd)	Primjenjivo za procjenu čvrstoće u srednjem dijelu broda te za procjenu čvrstoće smičnih naprezanja	/	/	/
			12.50	1994000	-104300				

5.3. Analiza podobnosti [4]

Model podobnosti nam daje informaciju o prekoračenju odziva konstrukcije i o nedovoljnoj sigurnosti elemenata strukture. Predstavljen je bibliotekom analitički zadanih projektnih kriterija – BIBLIOTEKA OGRANIČENJA koja ograničava izbor projektnih varijabli samo na one za koje će projekt konstrukcije biti dobar, odnosno koje će zadovoljiti sve projektne kriterije ograničenja. Biblioteku ograničenja čini matematička formulacija projektnih kriterija u formi projektnih ograničenja kao funkcije projektnih varijabli. Izlazne rezultate BIBLIOTEKE OGRANIČENJA predstavljaju, za pojedine kriterije ograničenja, vrijednosti za IZDRŽLJIVOST – C (*Capability*), ZAHTJEV – D (*Demand*) i PARAMETAR PODOBNOSTI – g (*adequacy parameter*). Odnos gore navedenih vrijednosti prikazan je u normaliziranom obliku (32):

$$g = \frac{C - \gamma D}{C + \gamma D} \quad (32)$$

gdje je:

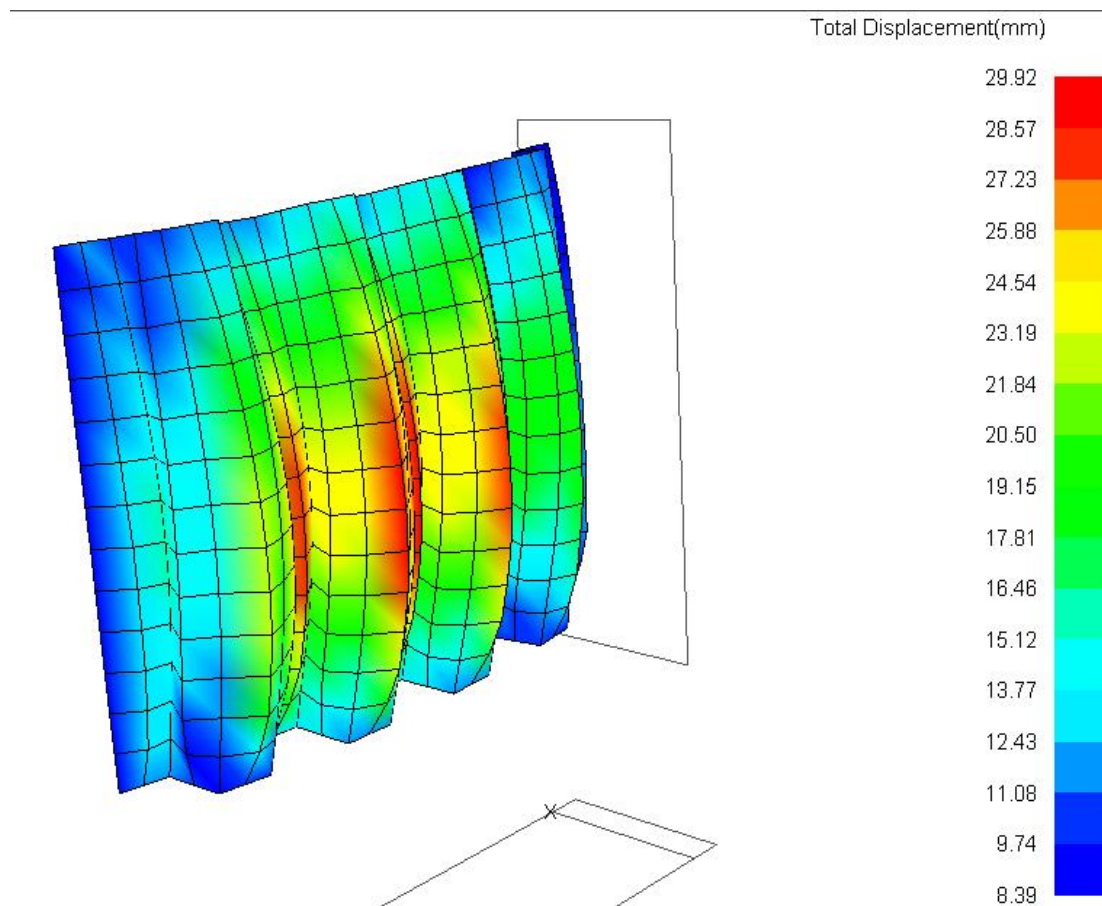
- g : faktor podobnosti
- C : izdržljivost (*Capability*)
- D : naprezanje (*Demand*)
- γ : faktor sigurnosti

Parametar podobnosti g je rangiran od -1 do +1. Sigurnost elementa je zadovoljena ako se g nalazi između 0 i 1, odnosno nije zadovoljena za g manji do 0.

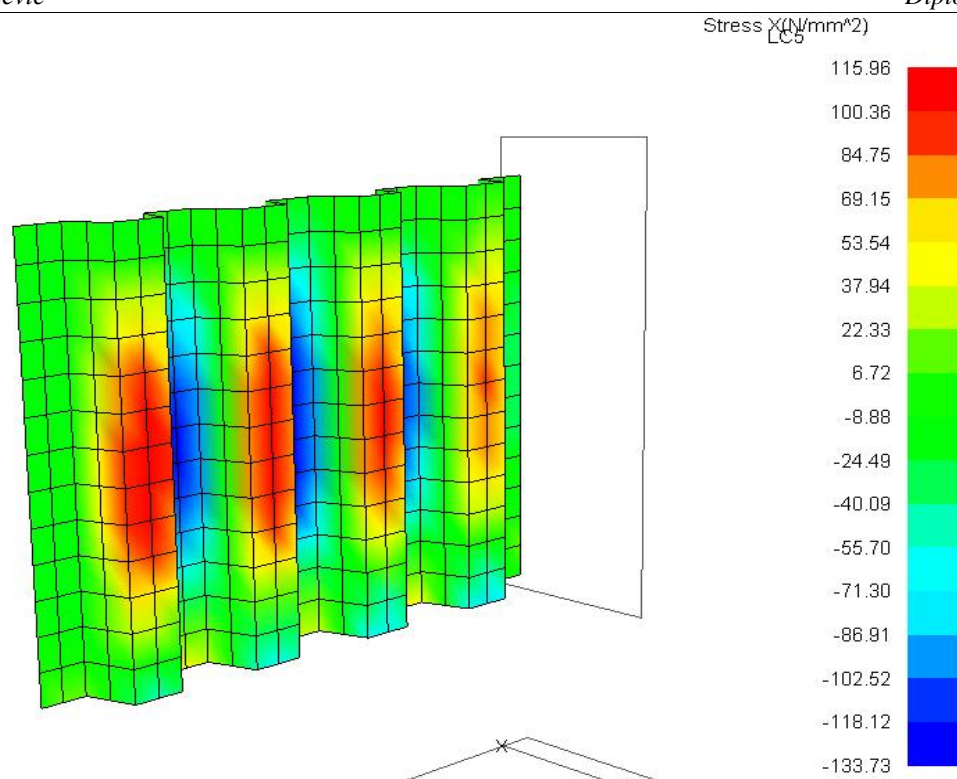
5.4. Analiza rezultata MKE

Nakon izvršene prve faze proračuna prema preskriptivnim pravilima, vrši se proračun drugu faze odnosno provjera konstrukcije naborane pregrade MKE. Rezultati ti provjere prikazani su na sljedećim slikama. Na slikama je prikazan odziv koji odgovara slučaju opterećenja 5 (LC5).

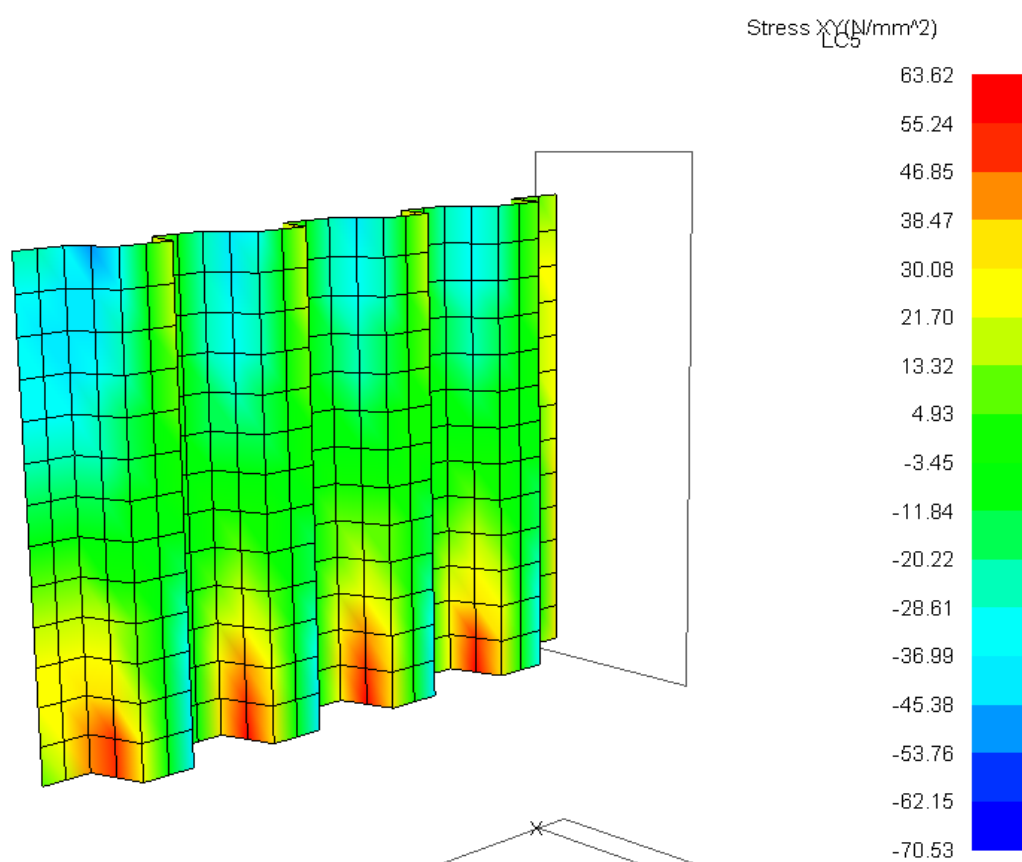
5.4.1. Odziv prototipa



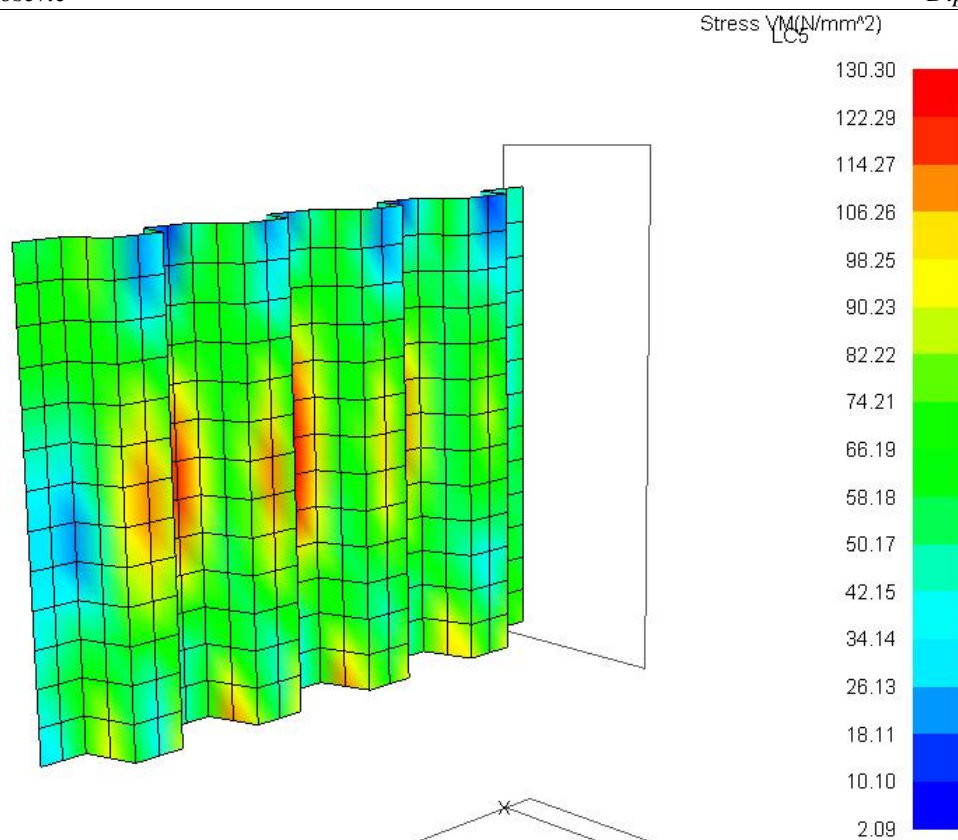
Slika 14. Prikaz pomaka prototipa



Slika 15. Naprezanja u smjeru osi x prototipa

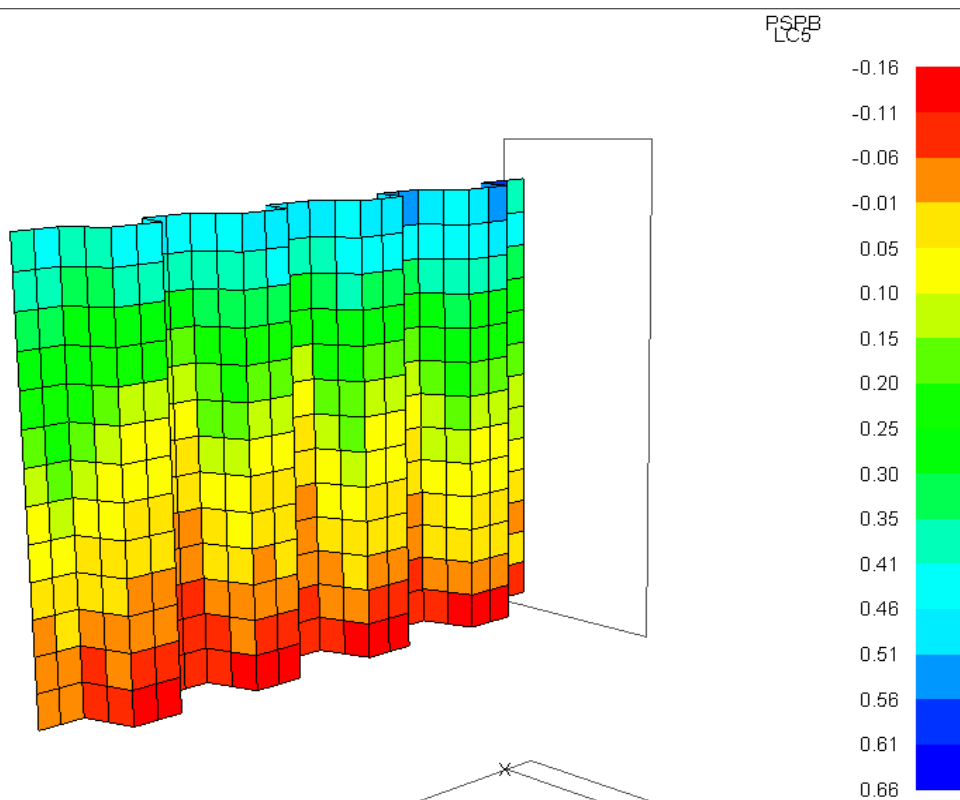


Slika 16. Smična naprezanja prototipa



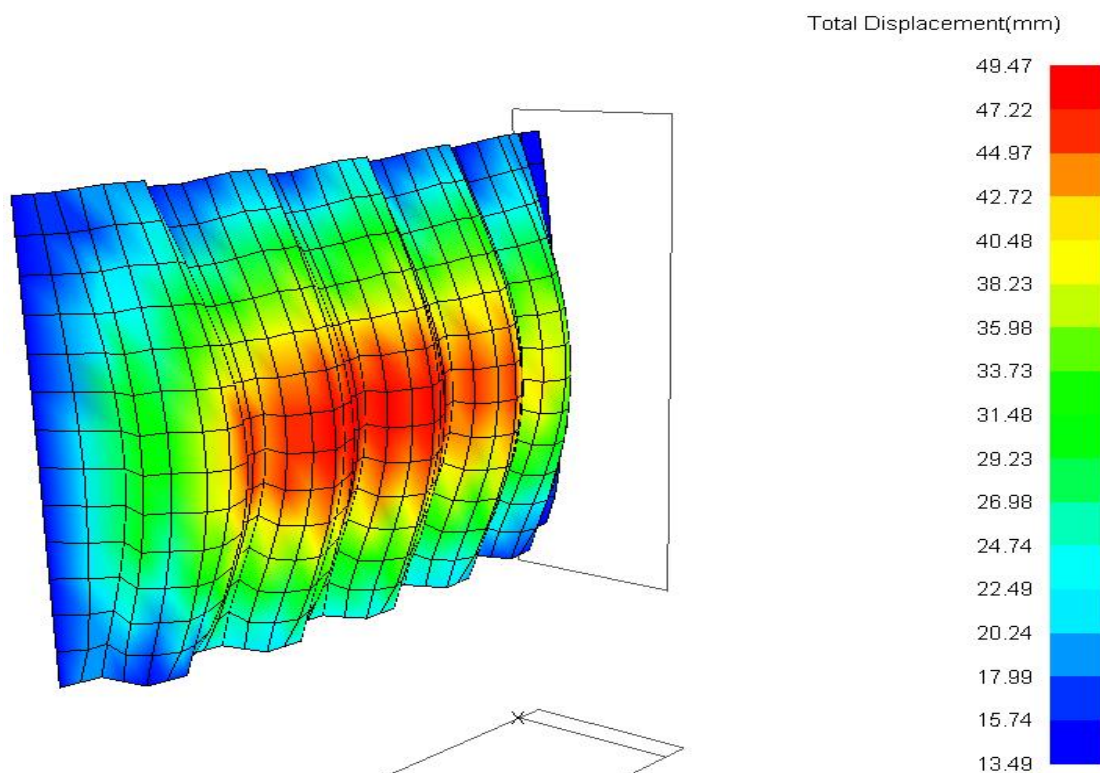
Slika 17. Von Mises naprezanja prototipa

Na Slika 18 prikazan je kriterij podobnosti koji nije zadovoljen u ovom slučaju opterećenja.

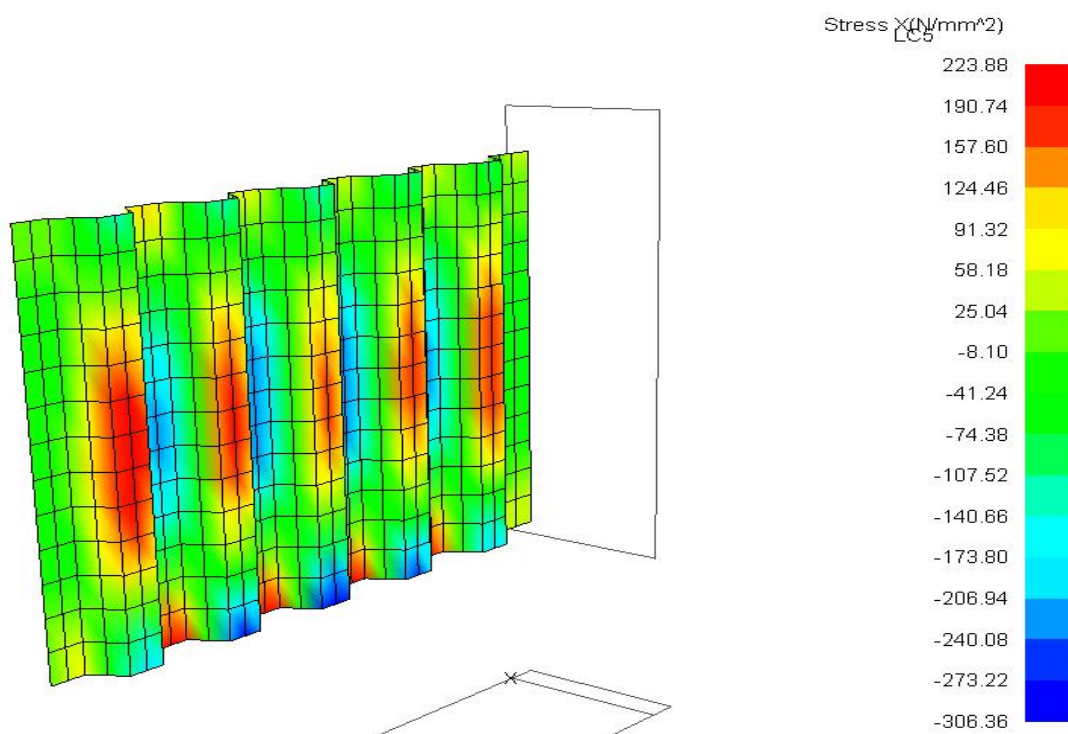


Slika 18. PSPB kriterij podobnosti prototipa

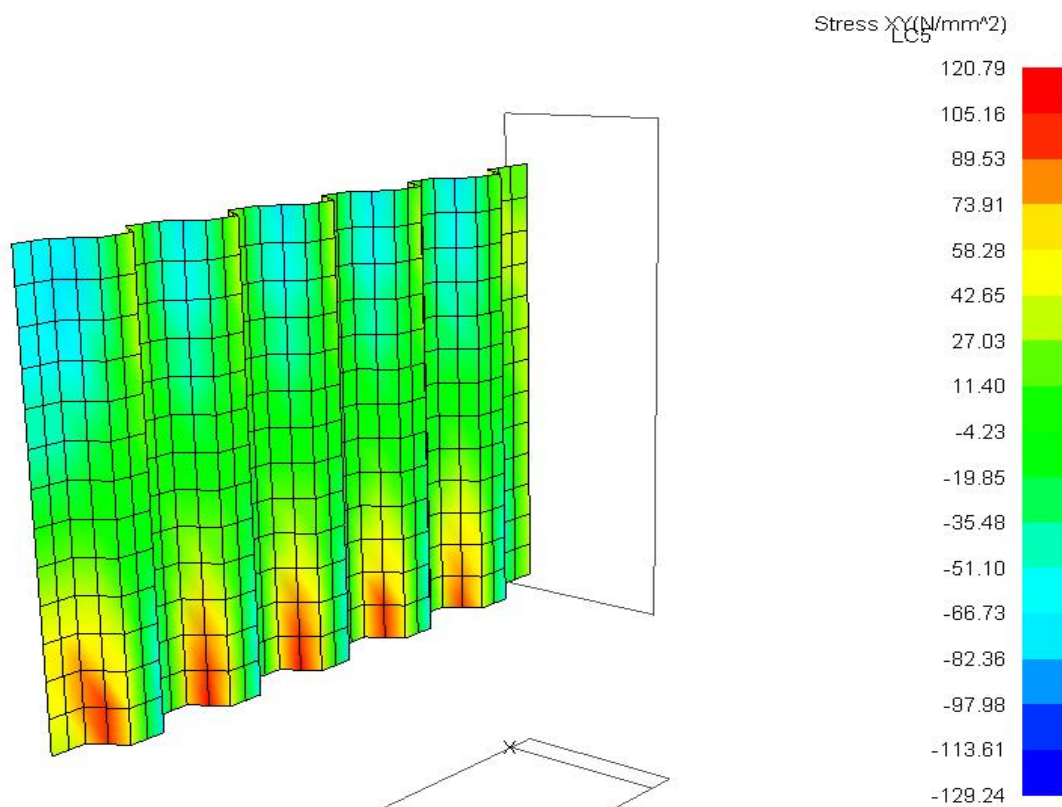
5.4.2. Odziv optimalnog modela



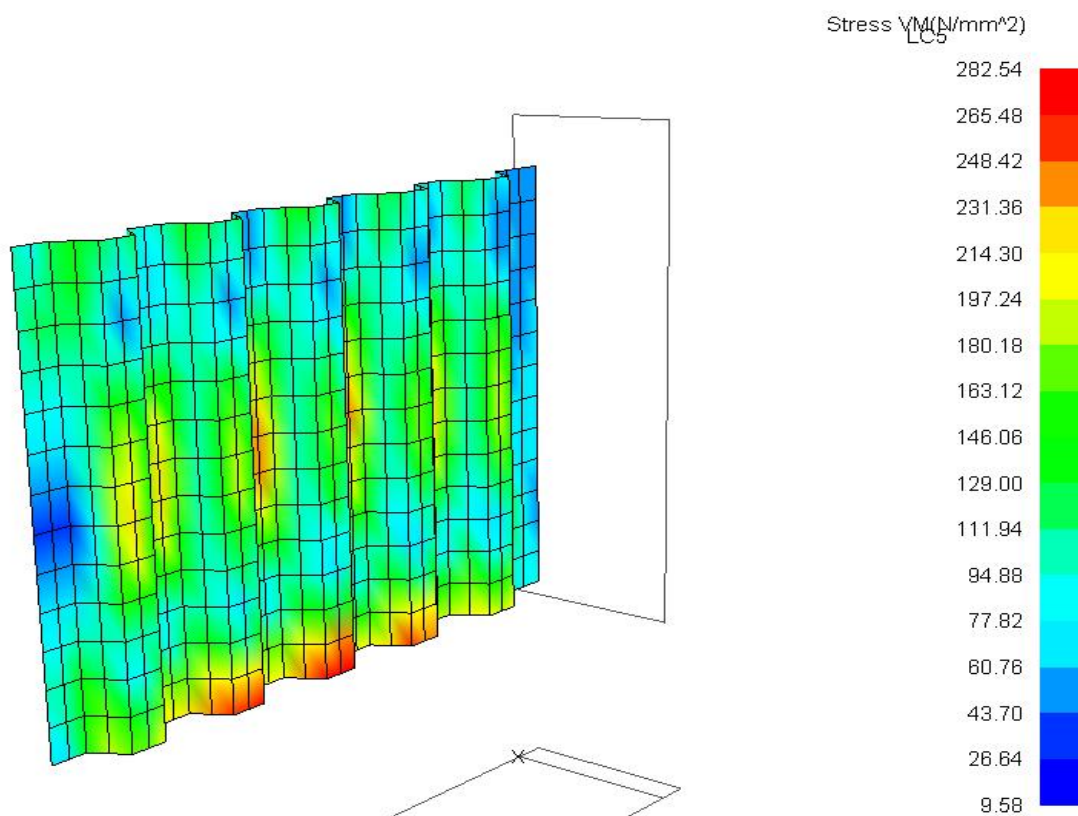
Slika 19. Prikaz pomaka optimalnog modela



Slika 20. Prikaz naprezanja u smjeru osi x optimalnog modela

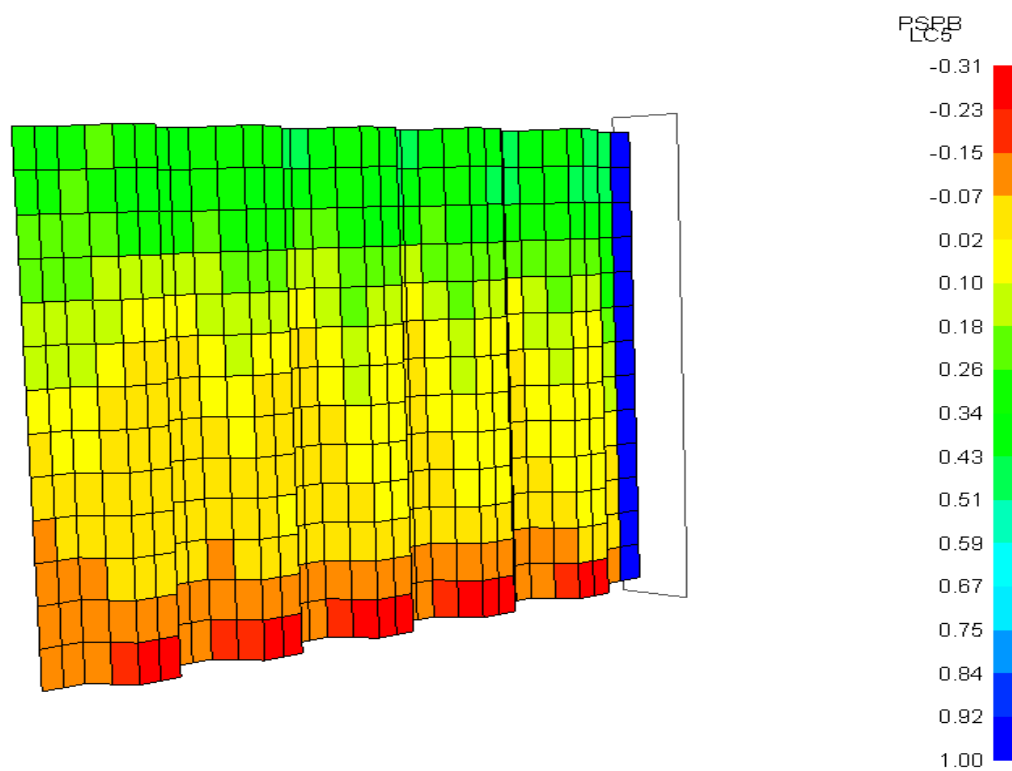


Slika 21. Prikaz smičnih naprezanja optimalnog modela

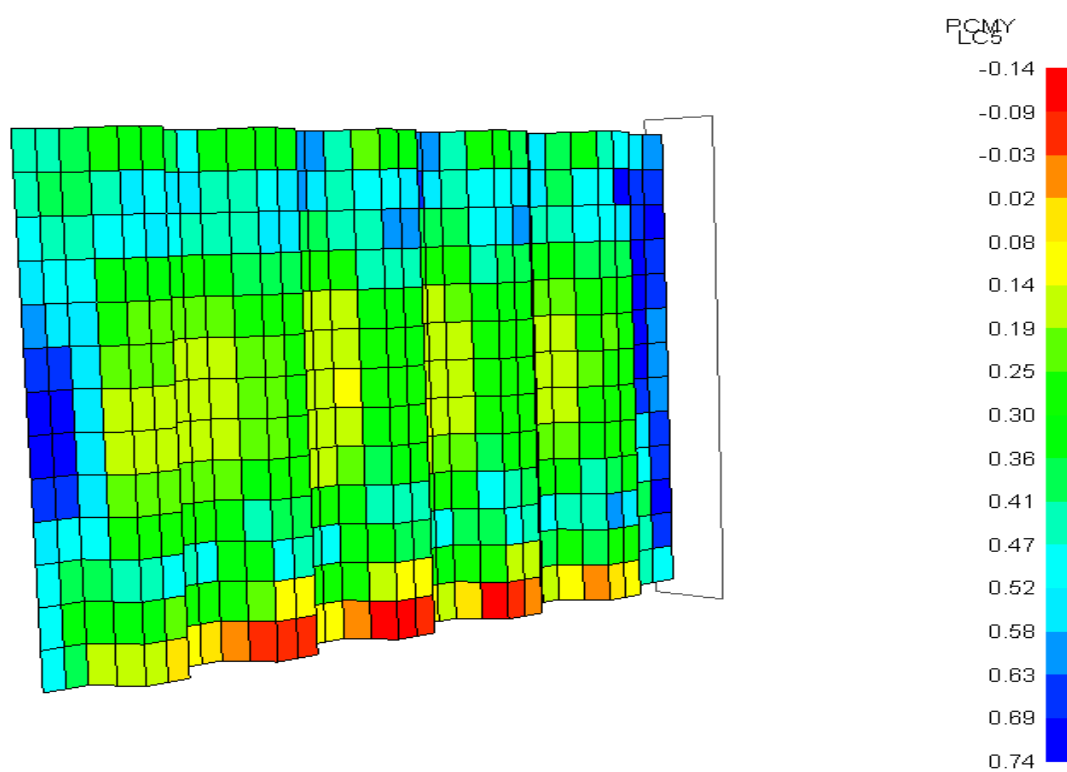


Slika 22. Prikaz Von Mises naprezanja optimalnog modela

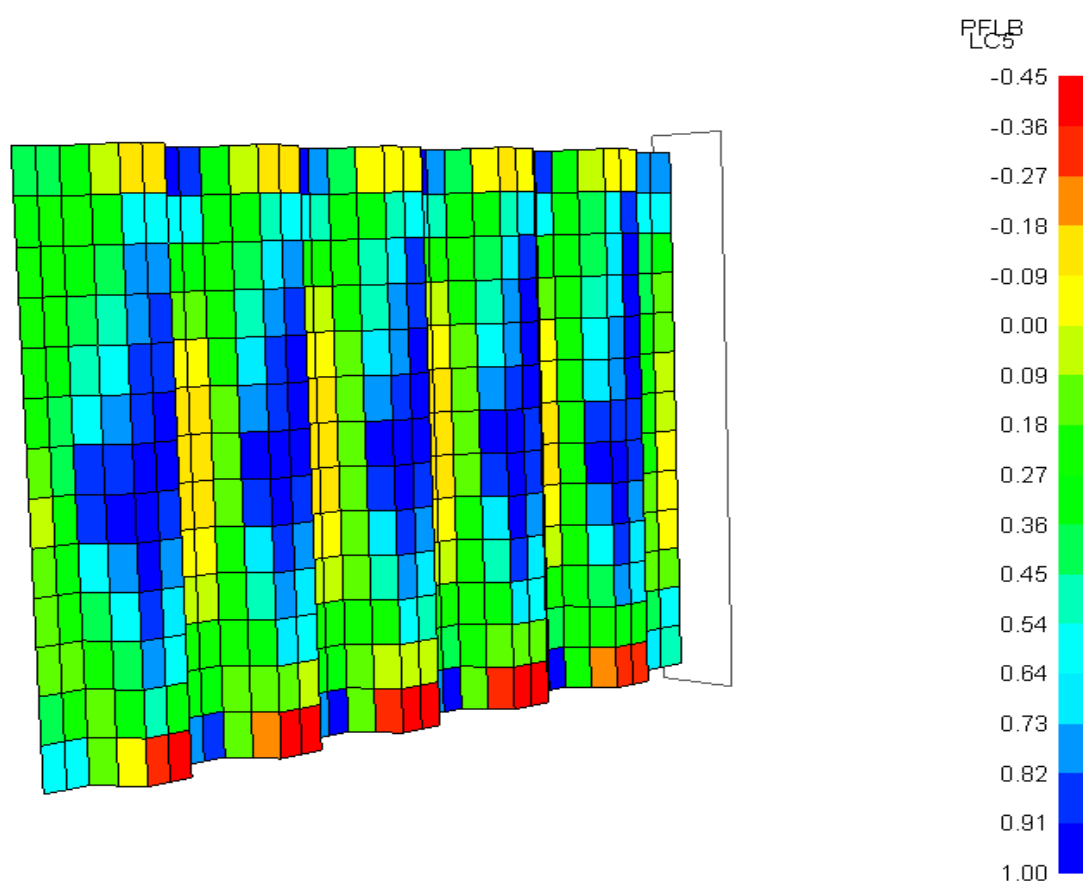
Na sljedećim slikama su prikazani kriterije podobnosti koje ne zadovoljava optimalni model dobiven prema preskriptivnim pravilima.



Slika 23. PSPB kriterij podobnosti optimalnog modela



Slika 24. PCMY kriterij podobnosti optimalnog modela



Slika 25. PFLB kriterij podobnosti odabranog modela

Na slikama možemo vidjeti da su kriteriji podobnosti najviše nezadovoljeni na donjem kraju pregrade, odnosno na spoju pregrade sa gornjim opločenjem donje stule.

U Tablica 10 dana je usporedba rezultata prototipa i optimalnog modela nakon prve faze proračuna, odnosno proračuna prema preskriptivnim pravilima.

Tablica 10. Usporedba nakon prve faze proračuna

			Maksimalna naprezanja, N/mm ²			Kritični kriteriji podobnosti	Masa, t
Model	t_{kor} , mm	Maksimalni pomak, mm	σ_x	τ_{xy}	σ_{VM}		
Prototip	16,75	29,92	133,73	70,53	130,3	PSPB(LC10)= -0,26 PFLB(LC10)=-0,26	29,33
Optimalni	11,75	49,47	-306,36	129,24	282,54	PCMY(LC5)=-0,19 PSPB (LC3) =-0,31 PFLB (LC5)=-0,45	18,63

5.5. Prijedlog rješenja

S obzirom na to da ni pregrada prototipa, ni optimalna pregrada izračunate prema preskriptivnim pravilima ne zadovoljavaju kriterije podobnosti u MAESTRU, potrebno je pronaći rješenje koje će zadovoljavati. Kako je geometrija naborane pregrade već definirana, jedino što nam preostaje jest povećanje debljine pregrade. Debljina pregrade prototipa je povećana na 19,25 mm, a debljina optimalne pregrade na 17,75 mm.

Tablica 11. Usporedba rezultata nakon povećanja debljine

			Maksimalna naprezanja, N/mm ²			Kritični kriteriji podobnosti	Masa, t
Model	t_{kor} , mm	Maksimalni pomak, mm	σ_x	τ_{xy}	σ_{VM}		
Prototip	19,75	31,65	102,49	59,84	115,96	/	33,57
Optimalni	17,75	41,2	-205,68	87,69	190,53	/	27,61

Iako je debljina dosta povećana, ipak je s novom optimalnom pregradom ostvarena ušteda u masi kao što vidimo u Tablica 11.

6. ZAKLJUČAK

Projektiranje i gradnja konstrukcije broda za prijevoz nafte danas se provodi prema preskriptivnim harmoniziranim zajedničkim pravilima za projektiranje konstrukcije brodova za prijevoz rasutog tereta i tankera za prijevoz nafte. Za određivanje dimenzija konstrukcije potrebno je prvo provesti dimenzioniranje prema preskriptivnim pravilima te u idućem koraku i analizu čvrstoće konstrukcije primjenom metode konačnih elemenata (MKE).

Kroz rad je razvijen matematički model kojim se uz pomoć optimizacijskog algoritma određuje optimalna geometrija poprečne vertikalne naborane pregrade tankera za prijevoz nafte uz zadovoljenje minimalnih dimenzija prema pravilima što predstavlja prvu fazu proračuna. Navedeni model je primijenjen na primjeru projektiranja vertikalne naborane pregrade broda za prijevoz nafte te je određena optimalna konstrukcija s obzirom na ciljeve minimizacije mase i cijene. Nakon toga provedena je analiza optimalne i prototipne konstrukcije metodom konačnih elementa u programskom paketu MAESTRO. Nakon provedene analize može se zaključiti da geometrija prototipne i optimalne pregrade dobivene prema preskriptivnim harmoniziranim zajedničkim pravilima, ne zadovoljava kriterije podobnosti druge faze projektiranja prema harmoniziranim pravilima. Najveći problem predstavlja spoj donjeg kraja naborane pregrade s gornjim limom donje stule. Kako je geometrija stule definirana optimizacijskim algoritmom, jedino rješenje koje se ovdje može iskoristiti jest povećanje debljine naborane pregrade. Povećanjem debljine prototipne sa 17,25 mm na 19,75 mm i optimalne sa 11,75 mm na 17,75 mm zadovoljavaju se svi kriteriji podobnosti. Iako je povećana debljina pregrade, ipak je ostvarena ušteda u masi za 17 % na promatranom prototipu unutar ovog diplomskog rada.

Matematički model za dimenzioniranje konstrukcije naborane pregrade razvijen kroz ovaj rad pokazuje potencijal za brzu i jednostavnu primjenu. Budući rad na unaprjeđenju funkcionalnosti razvijenog matematičkog modela mogao bi obuhvatiti implementaciju proračuna tlaka te dodavanjem pravila vezanih za uzdužne pregrade i spoj vertikalnih i uzdužnih pregrada. Implementacija navedenih funkcionalnosti mogla bi rezultirati s programskim alatom koji projektantu uz relativno malo ulaznih parametara daje uvid u ponašanje konstrukcije naborane pregrade odnosno omogućuje jednostavno početno dimenzioniranje.

LITERATURA

- [1] R. Parunov, Analiza čvrstoće poprečne vertikalno korugirane pregrade tankera za kemikalije, Rijeka, 2017.
- [2] K. Žiha, »Nastavni materijali za predavanje iz konstrukcije broda II,« [Mrežno]. URL: <https://www.fsb.unizg.hr/kziha/shipconstruction/>. [Pokušaj pristupa 5. 1. 2018.].
- [3] IACS, Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil tankers, 2017.
- [4] T. Stipić, Strukturna analiza i optimizacija teretnog prostora broda za rasuti teret, Sveučilište u Zagrebu: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015
- [5] »ENGINEEREXCEL,« [Mrežno]. URL: <http://www.engineerexcel.com/excel-solver-solving-method-choose/>. [Pokušaj pristupa 10. 01. 2018.].
- [6] B. Haraminčić, Određivanje optimalne geometrije velikih otvora u vanjskoj oplati nadgrađa višepalubnih brodova, Sveučilište u Zagrebu: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017.